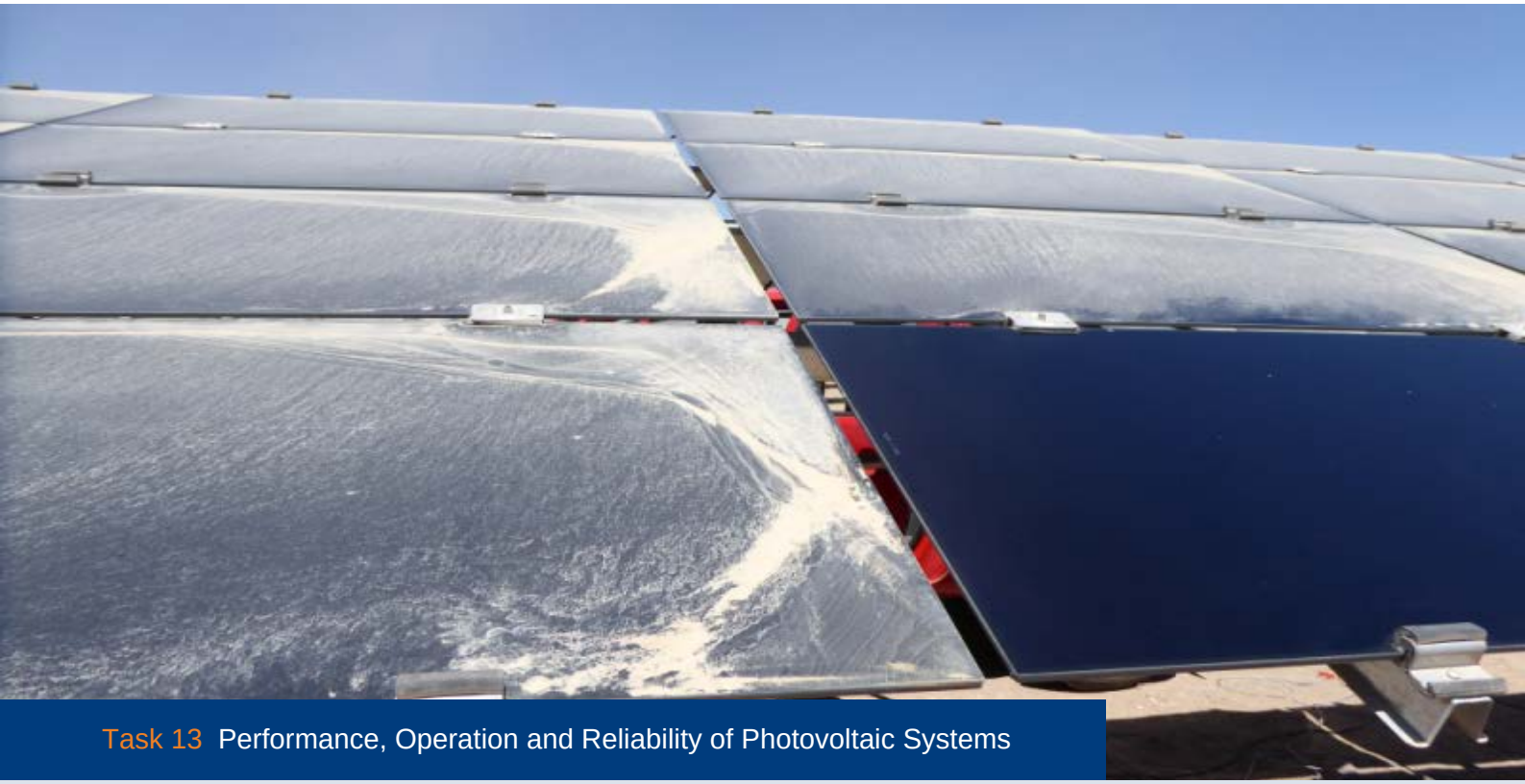
Technology Collaboration Programme
by iea

International Energy Agency
Photovoltaic Power Systems Programme



Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems

PVPS

오염 손실 – 태양광발전 플랜트의 성능에 미치는 영향

Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants

2022

국제에너지기구

태양광발전시스템 프로그램

옮김 윤 경 훈
한국에너지기술연구원

Report IEA-PVPS T13-21:2022

What is IEA PVPS TCP?

1974년 설립된 국제에너지기구(IEA)는 경제협력개발기구(OECD)의 틀 내에서 회원국들 간의 포괄적인 에너지협력 프로그램을 수행하는 자치기구이다. 기술협력 프로그램(Technology Collaboration Programme: TCP)은 미래 에너지 안보와 지속가능성은 글로벌 협력으로 시작된다는 믿음 하에 만들어진 것이다. 이 프로그램에는 정부, 학계 및 산업계의 전문가 6,000명이 참가하고 있으며 공동 연구의 향상과 특정 에너지 기술의 활용에 기여하고 있다.

IEA PVPS(태양광발전시스템 프로그램)는 TCP의 하나로 1993년에 설립되었다. 프로그램의 임무는 "지속 가능한 에너지시스템으로 전환하는데 태양광에너지가 핵심적인 역할을 하도록 국제협력을 강화하는 것이다. 이를 달성하기 위해 프로그램의 참여자들은 태양광 발전시스템 활용 분야에서 다양한 공동 연구 프로젝트를 수행하여 왔다. 전체 프로그램은 각국 별로 대표 한 명 혹은 기구 멤버로 구성된 집행위원회(Executive Committee)가 관장하고, 여기서 연구 프로젝트나 활동 영역이 될 수 있는 분명한 "Tasks"를 지정하게 된다.

IEA PVPS 참여국은 호주, 오스트리아, 벨기에, 캐나다, 칠레, 중국, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 한국, 말레이시아, 멕시코, 모로코, 네덜란드, 노르웨이, 포르투갈, 남아공, 스페인, 스웨덴, 스위스, 태국, 터키, 미국이다. EC(유럽연합 집행위원회), Solar Power Europe, Smart Electric Power Alliance(SEPA), Solar Energy Industries Association도 멤버이다.

Visit us at: www.iea-pvps.org

What is IEA PVPS Task 13?

IEA PVPS 프레임워크 내에서 Task 13은 태양광 구성요소와 시스템의 운영, 신뢰성 및 품질의 향상 측면에서 시장 참여자들을 지원하는 것을 목표로 하고 있다. 프로젝트 내에서 수집된 다양한 기후대에 있는 태양광시스템의 운영 데이터는 시스템의 신뢰성과 성능을 추정하는 기초로 제공된다. Task 13은 광범위한 환경과 활용분야에서 태양광시스템의 품질, 성능, 신뢰성과 수명에 영향을 미치는 기술적인 측면의 자료를 요약하고 보고하는 공동의 플랫폼을 제공하고자 한다. 함께 국경을 초월하여 협력함으로써 각 회원국으로부터의 연구와 경험들을 모두 활용할 수 있을 것이고 이들 지식들을 결집 종합하여 태양광시스템이 최적의 상태에서 성능을 낼 수 있는 최선의 사례들과 방법들을 발굴하고 그리고 경쟁력 있는 투자 회수가 가능하도록 지속적으로 노력하고자 한다.

Task 13은 지금까지 태양광 구성요소와 시스템의 품질에 대한 지표가 될 수 있는 다양한 파라미터들의 계산에 필요한 올바른 체계를 구축해 오고 있다. 고품질의 보고서와 함께 이런 체계들은 매우 유용하여 태양광 산업계가 이러한 결과물에 대해 감사함을 표하고 있다.

IEA PVPS Task 13의 참여국은 호주, 오스트리아, 벨기에*, 캐나다, 칠레, 중국, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 네덜란드, 노르웨이, 스페인, 스웨덴, 스위스, 태국과 미국이다.

이 보고서는 태양광의 전체 가치 사슬에서의 역할에 따라 다양한 이해관계자에게 서로 다른 기능을 제공하는 것을 목표로 기후별로 태양광시스템의 운영 및 유지보수에 대한 지침을 다룬다. Task 13의 추가 정보 및 결과는 다음에서 확인할 수 있습니다: https://iea-pvps.org/research-tasks/performance-operation-and-reliability-of-photovoltaic-systems/.

* 벨기에는 2022 년 7 월 1 일부터 IEA PVPS 에 더 이상 참여하지 않고 있다.

DISCLAIMER

The IEA PVPS TCP is organised under the auspices of the International Energy Agency (IEA) but is functionally and legally autonomous. Views, findings and publications of the IEA PVPS TCP do not necessarily represent the views or policies of the IEA Secretariat or its individual member countries.

COVER PICTURE

칠레 아타카마 사막에 소재한 태양광 플랜트에서의 오염. 사진 제공: Fraunhofer ISE/Andreas Steinhüser

ISBN 978-3-907281-09-3: Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

IEA PVPS Task 13

Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems

(태양광시스템의 성능, 운영과 신뢰성)

Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants

(오염 손실 – 태양광발전 플랜트의 성능에 미치는 영향)

Report IEA-PVPS T13-21:2022

December 2022

ISBN 978-3-907281-09-3

AUTHORS

Main Authors

Christian Schill, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany

Anne Anderson, Research Institutes of Sweden AB (RISE), Sweden

Christopher Baldus-Jeursen, CANMET Energy Technology Centre, Canada

Laurie Burnham, Sandia National Laboratories, USA

Leonardo Micheli, Universidad de Jaén, Spain

David Parlevliet, Murdoch University, Perth, Australia

Eric Pilat, CEA INES, France

Bengt Stridh, Mälardalens högskola, Sweden

Elías Urrejola, Atamostec, Chile

Contributing Authors

Manjunath Basappa Ayanna, CSIR, South Africa

Gianluca Cattaneo, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, Switzerland

Sebastian-Johannes Ernst, Fraunhofer ISE, Germany

Anil Kottantharayil, NCPRE, IIT Bombay, India

Gerhard Mathiak, DEWA Research & Development Center, United Arab Emirates

Erin Whitney, University of Alaska Fairbanks, USA

Rosmarie Neukomm, Bern University of Applied Sciences, Switzerland

Delphine Petri, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, Switzerland

Lawrence Pratt, CSIR, South Africa

Lina Rustam, Fraunhofer ISE, Germany

Thomas Schott, Bern University of Applied Sciences, Switzerland

Editor

Ulrike Jahn, VDE Renewables, Alzenau, Germany

Korean translation Yoon, Kyung-Hoon 윤 경 훈

March 2023

목차

감사인사 7
약어 8
요약 11
1 서론 14
2 오염의 물리적 및 화학적 원리 20
2.1 먼지의 물리적 및 화학적 특성 20
2.2 교결, 케이킹 및 캐필러리 에이징 23
2.3 이슬이 주도하는 오염 메커니즘 25
2.4 오염에서 수분의 검토 27
2.5 입자 퇴적과 응집력의 개요: 반데르발스력, 모세관힘, 정전기력 및 중력 28
3 오염과 눈 센싱 31
3.1 오염 메트릭스 31
3.2 오염과 눈 센서 시장의 개요 34
4 오염과 눈 모델 41
4.1 오염 모델 41
4.2 눈 모델 50
5 유틸리티 규모에서 오염에 의한 에너지와 수입 손실의 추정 56
5.1 오염의 경제적인 영향 56
5.2 전세계 오염 손실: 자원과 가변성 59
5.3 사례 연구: 온대기후에서의 장기적인 오염 손실 60
6 PV 시스템에서 오염 손실의 완화 63
6.1 예방적 완화 방법 64
6.2 시정적 완화 방법 71

6.3 포괄적인 “청소 최적 시간” 모델 “ 82

6.4 적설 영향의 완화 전략 87

7 눈에 의한 PV 시스템의 음영 89

7.1 서론 89

7.2 고 위도에서 PV 시스템의 성능 인자 90

7.3 눈의 세계적 분포 92

7.4 눈 연구를 위한 중점 지역 94

7.5 눈 손실 메트릭스 95

7.6 눈이 많이 내리는 기후에 대한 설계 최적화 99

8 결론 108

부록 1: 입자 조성과 용해도 110

부록 2: 먼지 조성 서베이 112

부록 3: 오염에 영향을 미치는 거시적, 제어 가능한 및 미시적인 인자들 114

참고 문헌 117

부록 영어-한글 용어 비교 129

감사인사

This paper received valuable contributions from several IEA-PVPS Task 13 members and other international experts, as outlined below.

This report is supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under contract no. 0324304A and no. 0324304B.

Part of this work was funded through the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the NoSoilPV project (Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 793120).

Anil Kottantharayil would like to acknowledge co-workers S. Bhaduri, S. Chattopadhyay, S. Zachariah, and C. S. Solanki from NCPRE, IIT Bombay for contributions to the work reported in the subchapter "New Module- and Plant Concepts".

Lina Rustam would like to acknowledge Klemens Ilse, Fraunhofer CSP, Germany, for contributions to subchapter "Anti-Soiling Coatings".

Erin Whitney would like to acknowledge colleagues Christopher Pike, Michelle Wilber, Dr. Joshua Stein, Dayne Broderson, Rob Bensin, David Light, Henry Toal, Iris Tuller, and Christie Haupert for their contributions to the University of Alaska Fairbanks Solar Test Site and data analysis efforts. The Solar Test Site and its resulting data were made possible through a Cooperative Research and Development Agreement (CRADA) between the University of Alaska and Sandia National Laboratories as well as generous support from the United States Department of the Navy, Office of Naval Research.

Many thanks go to Erin Whitney and colleagues for the editing of the executive summary, technical and language editing and proof-reading of this report, and also to Leonardo Micheli for technical editing and support. Your help and support is highly appreciated.

본 보고서 한글 번역에 동의해 주신 IEA-PVPS 집행부와 Task 13 OA, 보고서의 저자들, 그리고 도움을 주신 한국에너지기술연구원 태양광연구단 멤버들에게 감사인사를 전합니다.

2023 년 3 월 윤 경 훈 (Yoon, Kyung-Hoon)

약어

AFm	Alumina, Ferric Oxide, Mono-Sulfate
AI	Artificial Intelligence
Al	Aluminium
ANN	Artificial Neural Network
ANOVA	Analysis of Variance
AOD	Aerosol Optical Depth
ARC	Anti-Reflection Coating
ASC	Anti-Soiling-Coating
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFH	Bern University of Applied Science
BoS	Balance of System
Ca	Calcium
CA	Contact Angle
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
Cd	Cadmium
CIS	Copper Indium Selenide
Cl	Chlorine
cm^2	Square-Centimetre
CMAQ	Community Multiscale Air Quality
CPL	Cost of Production Losses
CSP	Concentrating Solar Power
CWEEDS	Canadian Weather Energy and Engineering Data Sets
D	Particle Diameter
DNI	Direct Normal Irradiance
DOI	Digital Object Identifier
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
EDS	Electrodynamic Shield
EDX	Energy Dispersive X-Ray
EMC	Electromagnetic Compatibility
EP	Electricity Price
EPC	Engineering, Procurement and Construction
ESD	Electrostatic Discharge
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate
G	Gravitational Acceleration

GHCN	Global Historical Climatology Network
H	Hydrogen
HR	Hygrometry
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Infrared
I_{sc}	Short Circuit Current
I-V	Current-Voltage
K	Potassium
kHz	Kilohertz
kV	Kilovolts
kWh	Kilo-Watthour
LCOE	Levelized Cost of Energy
LED	Light Emitting Diode
MERRA	Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications
mg	Milligram
Mg	Magnesium
MW	Megawatt
N	Nitrogen
Na	Sodium
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCPRE	National Centre for Photovoltaic Research and Education
NNE	North-North-East
NNW	North-North-West
NOCT	Normal Operating Cell Temperature
NPV	Net Present Value
NREL	National Renewable Energy Laboratory
O	Oxygen
O&M	Operation & Maintenance
PA	Polyamide
PDF	Powder Diffraction File
PE	Polyester
PM	Particle Mass
PM10	Particulate Matter of Size of 10 Microns and Below
P_{mpp}	Maximum Power Point

POA	Plane of Array
PV	Photovoltaic
RH	Relative Humidity
S	Sulphur
SAM	System Advisor Model
SDS-WAS	Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System
SEM	Scanning Electron Microscopy
Si	Silicon
Soiling Rate	Daily Variation in Soiling Ratio while Soiling Deposits on PV Module Surface
Soiling Ratio SR	Current Soiling State of the System
SR	Spectral Response
STC	Standard Testing Conditions
SUNY	State University of New York
SVI	Soiling Variability Index
T_a	Ambient Temperature
TEM	Transmission Electron Microscopy
TSP	Total Suspended Particles
TSPM	Total Suspended Particulate Matter
VAC	Volts Alternating Current
VDC	Volts Direct Current
VDI	Verein Deutscher Ingenieure, Association of German Engineers
V_{oc}	Open Circuit Voltage
W	Watt
WD	Wind Direction
WMO	World Meteorological Organization
W_p	Watt Peak
WS	Wind Speed
XRD	X-Ray Diffraction
A	Temperature Coefficient
M	Dynamic Viscosity of Air
Mm	Micro-Metre
P	Particle Density

요약

전세계적인 측면에서, 먼지와 눈에 의한 태양광 발전(PV) 시스템의 오염과 이에 따른 에너지 산출량 손실은 햇빛이 조사된 후 시스템 수율에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 특히 건조한 지역에서는 오염이 대규모 유틸리티 규모의 PV 플랜트에 미치는 영향이 상당하여 더 높은 운영비 및/또는 자본 지출(예, 오염방지 코팅(ASC)이나 청소용 로봇에 투자 및 그 유지보수)이 소요되어 수익감소로 이어질 수 밖에 없으므로 전체 시스템을 청소함으로써 이러한 영향을 완화할 필요가 있다.

이 보고서는 먼지 입자의 유형과 전체 분포(1 장), 메커니즘과 기여 인자(2 장), 센서와 측정 테크닉(3 장), 모델링 접근방법과 결과(4 장), 경제적 영향(5 장), 완화전략(6 장) 그리고 태양광 어레이가 점점 더 높은 고도에 설치됨에 따라 적설에 의해 발생하는 음영에 대해 설치와 운영 상의 특별 고려사항(7 장) 등 다양한 관점에서 오염의 여러 측면에 대해 요약한 것이다. 이 보고서는 PV 고객, PV 산업계, O&M 기업, 투자자, 자산 관리자, 시험 장비 개발자, 시험 회사, 표준화 당국 및 연구기관 등 PV 커뮤니티에 서비스를 제공하고자 한 것이다.

1 장(서론)은 입자 크기와 유형 및 전체 분포에 대한 개요를 제공한다. 특히, 글로벌 차원의 조사 결과는 아프리카와 아시아의 적도 지역에서 총 부유 입자 밀도가 100~200 μg/m3)로 가장 높다는 것을 보여주었다. 이 결과는 고 위도에서 적설에 의한 음영의 영향은 포함하지 않은 것이다.

2 장(오염의 물리적, 화학적 원리)은 유리와 PV 모듈 위의 먼지 입자 퇴적과 부착에 기여하는 인자들을 분석한다. 칠레 아타카마(Atacama) 사막과 카타르의 분석에서 알 수 있듯이 건조(arid) 혹은 반건조 기후에서 오염의 가장 지배적인 기여는 2~63 μm 범위의 토사 입자에 의한 것이다. 중간 내지 큰 입자(>10 μm)의 경우에는 중력에 의해 공기 중에 머무는 시간이 더 짧아지고, 반면에 매우 작은 입자(<1 μm)는 강우에 의해 대기에서 쉽게 제거되고 퇴적되지 않는다. 교결(cementation), 캐필러리 에이징(capillary aging), 점결(caking) 같은 기본적인 오염 형성 프로세스가 소개되었는데, 이 모두는 오염의 심각도, 지속성과 제거에 대한 저항력 등에 고유의 영향을 미친다. 이슬 형성 또한 입자의 퇴적 속도를 증가시키는 등의 역할을 하는데, 이러한 사례는 모듈 표면 유리가 적외선 영역에서 높은 방사율을 보이기 때문에 PV 모듈의 복사 냉각과 주위의 높은 습도 환경이 갖추어진 아타카마 사막에서 증명된 바 있다. 퇴적과 부착력에 대한 리뷰 결과에서는 모듈 위에 있는 10 μm 이하의 입자들은 바람에 의해 쉽게 제거되지 않음이 확인되었다.

3 장(오염과 눈의 센싱)은 어떤 종류의 센서, 메트릭스 및 작동 원리로 오염을 측정하는지에 대해 기술하고 있는데, 전기적(단락전류와 출력) 방법과 광학적(이미지 프로세싱 카메라, LED 및 반사율 측정) 방법으로 구분할 수 있다. 이 정보는 향후 오염 비율과 청소 결정 타임라인을 예측하는데 중요하다. 메트릭스는 일반적으로 오염비(soiling ratio)와 오염율(soiling rate)로 구성된다. 오염은 전체 모듈 표면 또는 플랜트에서 항상 균질하게 발생하는 것은 아니고 모듈의 하부에 축적되는 경향이 있다. 특히 오염이 균일하게 분포되지 않은 경우, 단락전류 측정은 PV 출력에 대한 오염의 실제 영향을 과소평가할 수 있다. 이러한 불균질성으로 인한 과소평가된 비용 인자를 감안하는 방안은 다중 오염 모니터를 전체 모니터링 인프라에 통합시키는 것이다. IEC 규격 61724 "Photovoltaic system performance -

Part 1: Monitoring" 은 사이트에서 언제 어디서 오염을 측정하고 믿을만한 결과를 얻기 위해 얼마나 자주 센서를 청소하는지에 대한 권장사항을 제공한다. 일반적으로 오염 센서 측정 정확도와 관련하여 다양한 오염 센싱 제품의 측정 불확도를 정량화하기 위한 추가 연구가 요구된다.

4 장(오염과 눈 모델)은 다양한 매개 변수 조합에 기반한 오염 모델링 방법의 개발에 대해 요약한 것이다. 이 모델들은 미시(마이크로) 모델, 지역 모델 및 거시(마크로) 모델로 분류할 수 있는데, 모두 장단점을 가지고 있다. 이 보고서는 선형 회귀, 반 물리적, 인공신경망(artificial neural network: ANN) 및 지리공간(geospacial) 모델을 구별하는데, 이들 각각은 고유의 적용분야와 장점 및 단점을 가지고 있다. 대부분의 모델은 국부적 현상에 대해 보정된다. 현재까지, 전 세계적으로 적용 가능한 모델은 더 높은 오염 손실에 대해서는 정확한 추이를 예측하는 경향이 있지만 사소한 손실들과는 상관관계가 낮아 보인다. 눈을 제거하기 위한 모델링도 논의되는데, 직접적인 에너지 손실 예측과 눈 덮임 예측의 두 가지 범주로 구분하고 있다. 끝으로 고 위도에서 오염 현상의 예측인자로서 두 개의 서로 다른 적설 모델로 예측된 에너지 손실을 추정하는 캐나다 사례연구를 소개하고 있다. 발견된 여러 불일치의 원인을 파악하고 더 많은 사이트에 대해 모델을 검증하기 위해서는 많은 연구가 추가로 요구된다.

글로벌 및 경제적 차원에서 문제에 대한 이해를 높이기 위해 이 보고서 5 장(유틸리티 스케일에서 오염에 의한 에너지 및 수입 손실 추정)에서는 글로벌 규모의 PV 플랜트에 대한 에너지 손실을 추정한다. 2018 년에는 오염으로 인해 최소 3~4%의 연간 PV 에너지 생산 손실이 발생한 것으로 추정되는데, 이는 30~50 억 유로의 경제적 손실에 해당한다. 이러한 종류의 손실은 에너지 생산 측면에서는 4~5%로 환산되고 2023 년까지 40~70 억 유로 범위의 후속적인 재정적 손실로 이어질 것으로 예상된다. 이는 몇 가지 요인에 의한 것이다. 예를 들어, 더 많은 PV 모듈이 중국이나 인도와 같은 높은 일조량 지역에 설치되지만, 이 지역은 오염에 더 많이 노출된다. 일부 지역에서 전기가격이 낮아지면 생산된 에너지에 따른 수입이 줄어들기 때문에 청소하기에 적절하지 않을 것이다. 끝으로, 동일한 오염 조건에서는 효율이 더 좋은 모듈이 효율이 더 낮은 모듈에 비해 에너지 손실이 더 커지게 된다. 다양한 제약 조건에서 수입 손실을 최소화하기 위해 가장 적합한 청소 일정을 확인할 수 있는 다양한 경제적 모델이 제안되었다. 5 장과 6 장에서는 이러한 종류의 모델과 그 성공 가능성을 검토하고 있다.

가능한 완화전략의 두 가지 범주는 6 장(PV 시스템의 오염 손실 완화)에 소개되어 있다. 첫 번째 범주는 현장 평가와 계획, 새로운 모듈 및 발전소 개념, 오염방지 코팅과 같은 예방적 방법이다. 두 번째는 다양한 유형의 청소(습식/건식 브러시, 청소 로봇, 전기역학적 청소 등)과 같은 시정적 완화 방법이다. 6 장에서는 또한 현장에서 청소 작업을 촉발하기 위한 의사 결정 지원 도구로서 일반적인 "최적의 청소시간(Best Time-to-Clean)" 모델에 대한 개요를 제공한다.

양면형 모듈의 등장, 더 높은 시스템 효율 및 더 낮은 비용으로 인해 고 위도 지역에서의 PV 시스템이 확산되고 있다. 7 장(눈에 의한 태양광 시스템의 음영)은 온도, 조사강도, 알베도 및 이들의 전체 분포와 같은 성능 인자에 중점을 두고 눈에 의한 PV 시스템의 음영에 대한 측면을 요약한다. 그런 다음 "눈 연구"에서의 핵심 영역이 강조되는데, 열-기계적 부하 스트레스와 관련된 신뢰성 측면뿐만 아니라, 눈에 의한 손실 평가, 성능 모델링 및 성능 최적화 등이다. 이러한 부하 응력은 극심한 겨울 폭풍과 동결/용융 사이클에 의해 악화되는데, 이로 인해 태양전지에 균열이 발생하고 모듈 프레임이 비틀어지며 코팅이

손상되면서 성능저하와 모듈 불량으로 이어진다. 그런 다음 7 장에서는 눈 손실 메트릭스를 정의하고 최종적으로 기후별로 기술과 설계의 선택이 측정 가능한 효율 향상으로 이어질 수 있음을 입증함으로써 눈이 많은 기후 지역 에 대한 설계 최적화를 제안한다. 선택사항은 모듈 아키텍처(예: 프레임 대 무프레임, 셀 스트링 등), 모듈 기술(셀 크기, 셀 설계, 양면형 대 단면형) 및 마지막으로 시스템 설계(모듈 방향, 지면 위 높이, 경사각도, 클립 설계 및 배치)와 같은 범주로 분류된다. 생산 손실을 완화하기 위해 고 위도에서의 PV 설치를 위한 유망한 고려사항에는 프레임리스 모듈, 더 높은 경사각도, 눈 흘러내림(snow-shedding) 코팅, 양면형 모듈, 모듈의 하단 가장자리에 눈이 쌓이는 것을 최소화하기 위한 어레이 높이에 대한 고려 등이 포함된다.

1 서론

특히 건조한 지역과 눈이 많이 내리는 지역에서는 광물 먼지와 눈으로 인한 음영과 그에 따른 PV 플랜트 성능 손실은 PV 산업에 큰 과제이다. 이러한 오염의 영향을 완화하기 위한 대책이 더 높은 운영 및/또는 자본 지출(예: 오염방지코팅(ASC) 또는 청소 로봇과 그 유지보수에 대한 투자)로 이어져 수입 감소로 이어질 수 있다. 전 세계적으로 건조하고 눈이 많은 지역에서 PV 보급의 지속적인 성장을 위해서는 오염의 과정, 영향 및 완화 조치에 대한 이해가 필요하다.

경사면에 먼지가 퇴적되는 것(오염방지 코팅의 유무와 무관하게)은 복잡하고 다차원적인 현상이다. 주요 매개변수는 상대 습도 및 이슬 발생, 풍속과 방향, 강수량 빈도와 강도, 오염의 유형 및 지형과 같은 지역 환경 조건이다[1]. 그러나, 수백 킬로미터에 걸쳐 먼지 이동과 같은 더 큰 규모의 영향도 있다. 토지 사용 및 토지 피복(cover)과 같은 다른 인자들은 농업 활동과 같이 오염 가능성에 영향을 미치는 인위적 활동의 사례들이다.

바람에 날리는 먼지 입자의 크기는 그림 1 에 나타낸 바와 같이 PM10 및 PM2.5 가 포함되는 1~100 μm 범위이다.

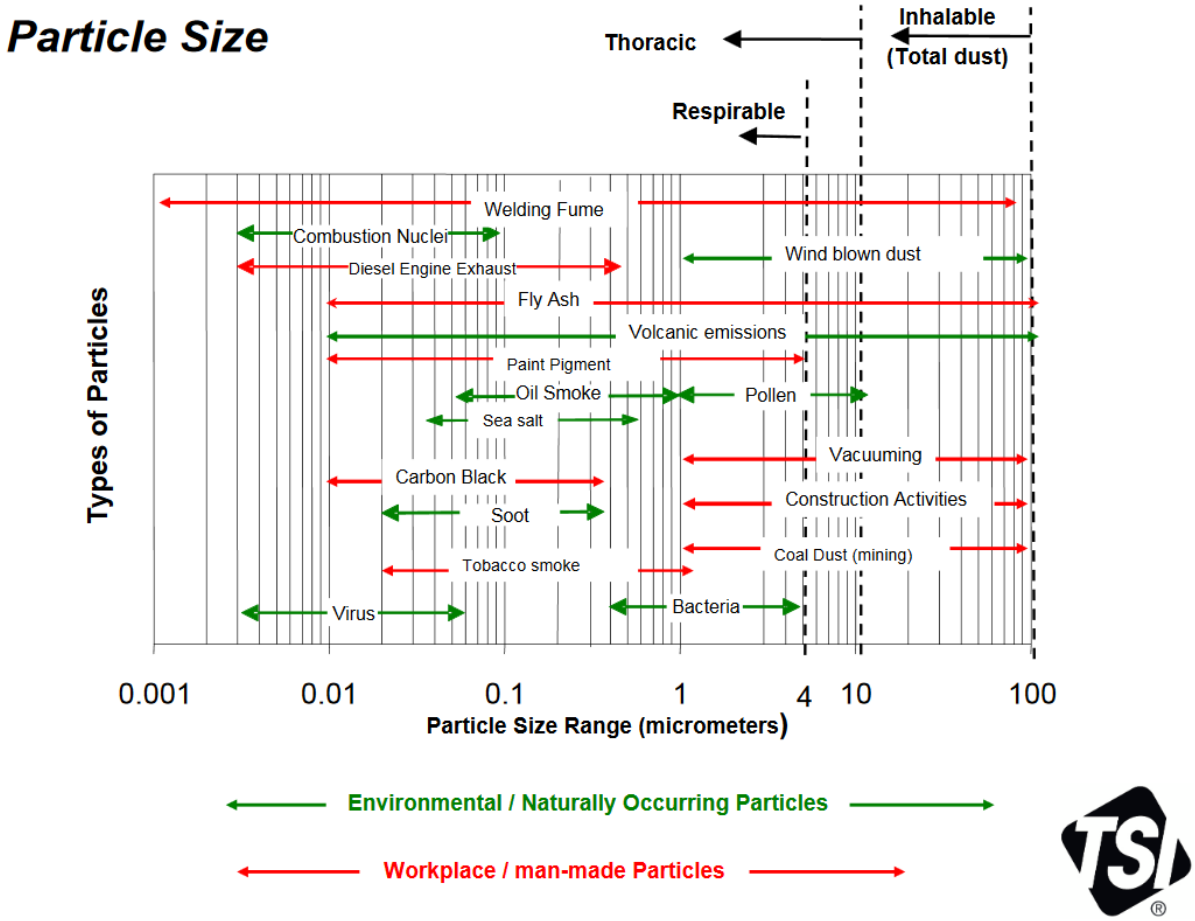


그림 1: 입자 크기의 분포, TSI 제공

각각 10 μm 혹은 2.5 μm 미만의 입자는 4 장에서 자세히 기술한 바와 같이 오염을 모델링 하는데 가장 좋은 대안 중의 하나이다 [2], [3]. 오염은 사이트의 특성에 고유한 문제로 계절에 따라 그리고 매년 달라질 수 있다 [4], [2]. Javed 등은 위에서 언급한 것과 같은 환경적 인자들이 매일의 오염 정도와 느슨한 상관관계를 가지고 있음을 보여주었다 [1].

그림 2 는 전 세계 공기 중 먼지 밀도의 계절적 변화를 보여준다. 이 값들은 에어로졸 광학깊이(Aerosol-Optical-Depths: AOD)의 위성 시계열 측정에서 도출된다. 더 어두운 부분은 먼지 밀도가 높은 영역을 나타낸다. 사하라 사막의 먼지 기둥이 대서양을 넘어 수백 킬로미터 떨어진 아메리카 대륙으로 이동되는 것은 주목할 만하다.

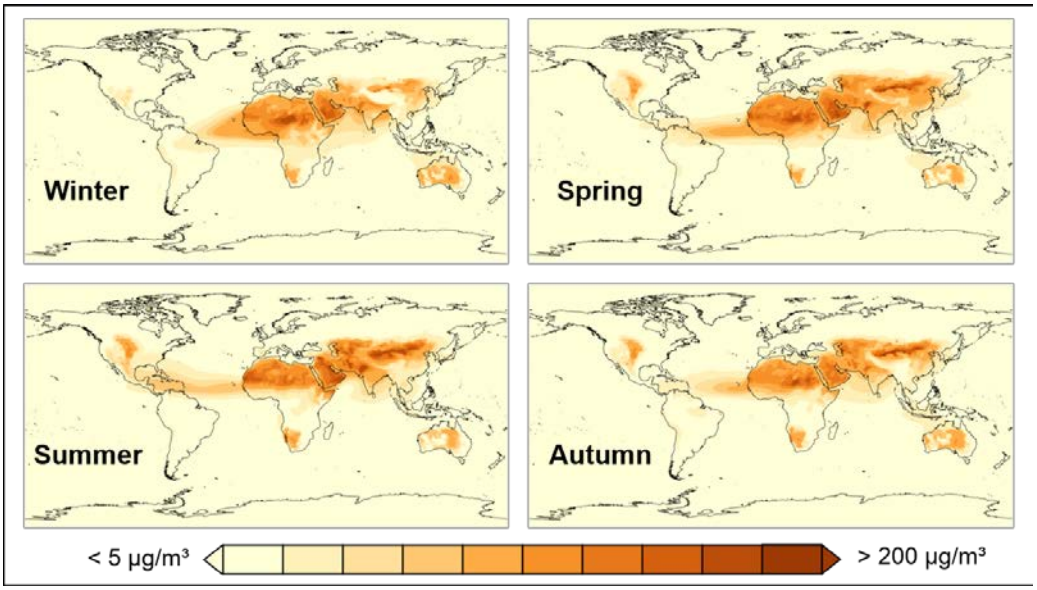


그림 2: 전형적인 먼지 연도(dust year)에서 도출된 총 부유 입자 밀도.

이 현상의 글로벌 차원과 특히 PV 플랜트의 에너지와 수입 손실은 5 장에서 자세히 논의한 바와 같이 엄청나다.

그 구성요소를 자세히 살펴보면, 오염은 PV 모듈의 유리 표면에 먼지, 때 및 오염물질의 축적으로 구성된다. 오염 형성의 원동력은 먼지의 물리적, 화학적 특성과 교결(cementation), 캐필러리 에이징(capillary aging), 점결(caking) 같은 프로세스이다. 습도는 PV 표면에 먼지의 부착력과 교결을 증가시킨다 [5], [6], [7]. 2 장에서는 이러한 오염의 기본 원리를 탐구한다.

퇴적된 오염층은 광학적 손실을 일으켜 태양전지에 도달하는 포톤의 수를 감소시키고 결과적으로 성능을 저하시킨다. 광학적 손실은 먼지의 존재로 인한 입사광의 흡광율, 반사율 및 분산 때문이다(그림 3) [8]. 이러한 영향은 오염방지 코팅(ASC)을 적용하여 일부 완화할 수 있다.

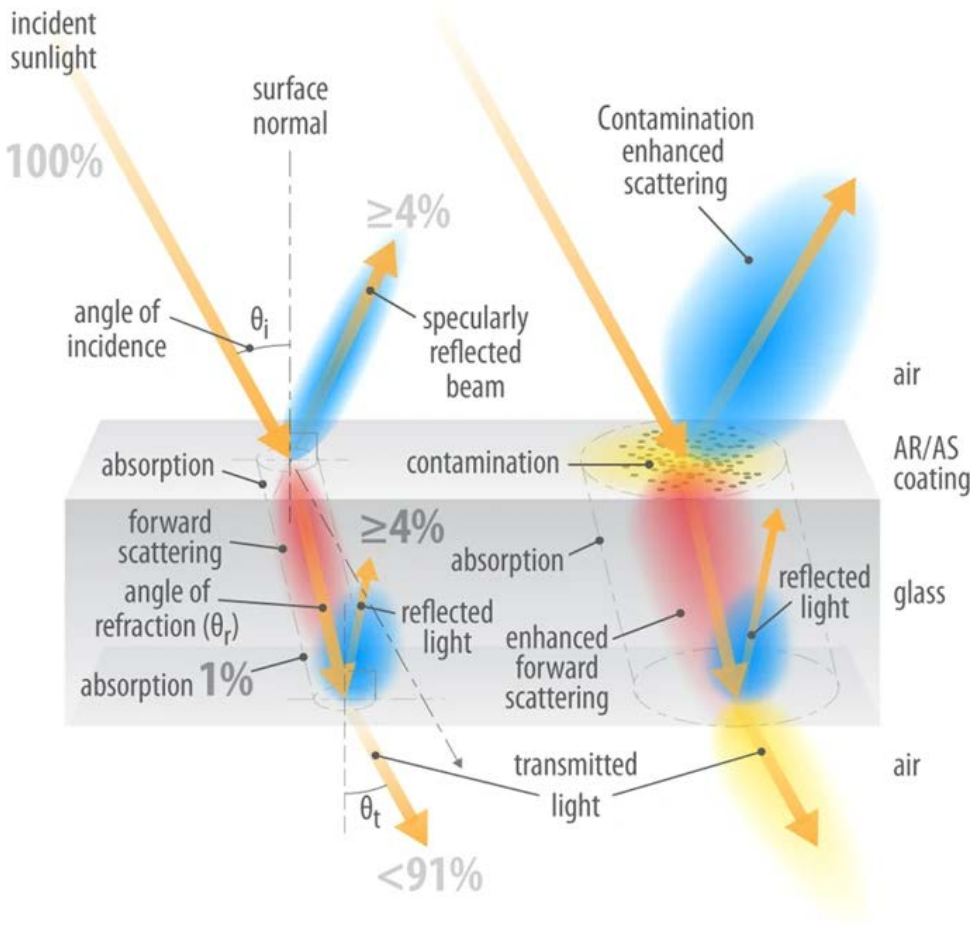


그림 3: 태양광모듈 유리 위의 오염이 입사광에 미치는 영향. Al Hicks(미국 NREL)가 작성한 다이어그램[9].

3 장 "오염과 눈 센싱"에서는 PV 사이트에서 오염의 양을 평가하기 위해 시장에서 가용한 센서 솔루션에 대해 자세히 기술한다. 이 센서들은 작동 원리가 상당히 다르다. 이상적인 센서는 향후 몇 년 동안 많은 PV 사이트가 무인화될 것이기 때문에 유지보수가 필요 없어야 한다. 오염을 센싱하는 것은 다양한 목적에 도움이 될 수 있는데, 예를 들어 플랜트를 청소하기 위한 최적의 시간을 찾거나 시스템 손실을 결정하는 것이다. 후자는 글로벌 규모에서도 가능하다.

오염은 PV 모듈 불량으로 인식되지 않지만 [10], PV 모듈의 전기적 산출량을 감소시키는 유해한 영향은 잘 알려져 있다.

전세계적으로 다양한 사례 연구는 많은 문헌에서 찾을 수 있으며, 여러 저자들은 사례 연구와 함께 광범위한 개요 목록을 작성하였는데 [11], [12], 여기에는 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 오염 지도, J. Josephson 에 의한 NCPRE(National Centre for Photovoltaic Research and Education)의 오염 사례 그리고 여타 문헌에서 가용한 정보 소스가 함께 한다. 그림 4 는 중간 범위 위도에 대해 세계적으로 합치된 오염의 연구 사례를 보여준다 [1].

[1] http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/

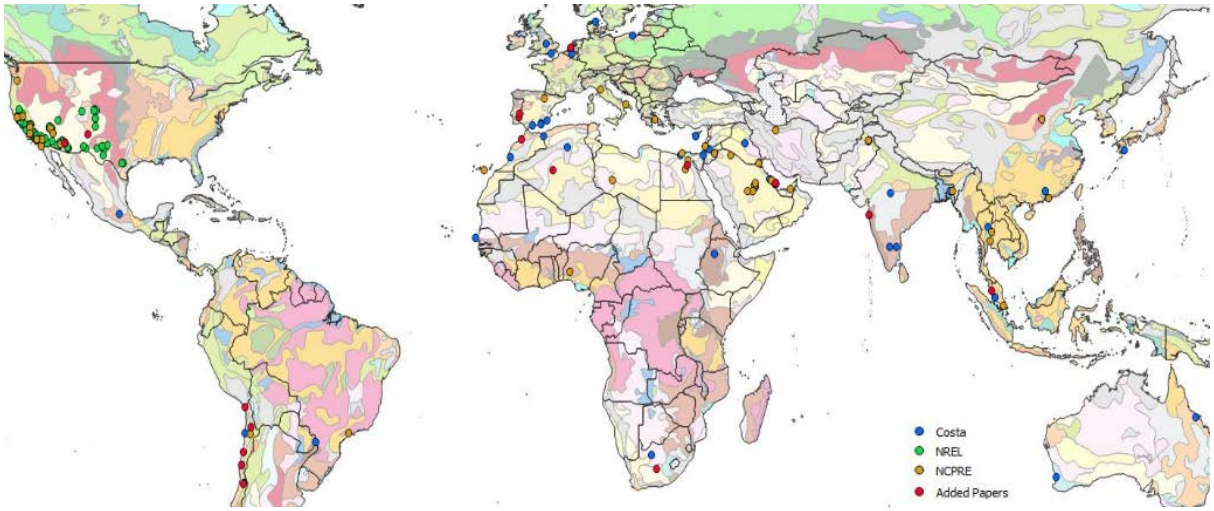


그림 4: 전세계적으로 선정된 오염 사례 연구를 통한 오염 분류.

그러나 이들 연구는 서로 다른 메트릭스를 사용하기 때문에 비교하고 규격화하기가 어렵고 일부 연구들은 가끔은 몇 주 동안의 짧은 시간 동안에만 수행된다. 전세계적으로 오염연구를 비교하기 위해서는 이 연구들이 적어도 수목 성장의 한 사이클 동안 수행되어 계절적 및 시간적 측면을 고려할 수 있어야 한다(위 참조).

문헌에서 몇 가지 사례를 이용하면,

- 스페인 Malaga 에서 PV 모듈 표면에 퇴적된 먼지 축적으로 인한 일일 평균 생산 손실이 약 4.4%였으며, 먼지가 축적되는 긴 건조 기간에는 이 값이 20% 이상이었다[13].
- 벨기에에서 5 주 동안 3%에서 4% 사이의 출력손실이 발생하였다 [14].
- 크레타 섬의 연간 오염 손실은 5.86%로 추정되었다.
- 남부 이탈리아의 시골에서는 모래 토양과 보다 단단한 토양에 건설된 플랜트에서 월간으로 각각 6.9%와 1.1%의 출력손실이 발견되었다[16].
- 쿠웨이트에서는 청소를 하지 않은 3 개월 동안에 오염 손실이 45.8%에 달하였다 [17].

전세계 대부분의 지역, 특히 건조한 지역에서 PV 모듈에 축적된 먼지는 유해하다 [18]. 또한, 지역적 또는 국부적 상황은 부정적인 부작용을 미칠 수도 있지만 때로는 긍정적인 부작용을 일으킬 수도 있다. 예를 들어, 아타카마 사막과 같은 바다 근처의 사막에서는 아침에 짙은 안개가 자주 나타난다. 이 안개는 태양복사의 직달(direct) 성분을 감소시키고 습기를 끌어당기는 먼지의 흡습적 특성에 기반한 부착력을 제공한다 [8], [19], [20].

바람이 불고 먼지가 많은 건조한 지역은 오염이 극심해 질 수 있다. 연구에 따르면 건조한 지역에서 더 짧은 시간 동안의 성능 저하가 온대 및 열대기후 지역에서의 몇 달 동안의 성능 저하와 비슷할 수 있다는 것이다. 반건조 및 건조한 사막 지역에서는 강우량이 부족하기 때문에 모듈의 자연적인 청소는 기대할 수 없다 [12].

전세계적으로 오염으로 인한 손실은 PV 시스템에 지속적인 문제가 되며, 에너지와 재정적 손실은 새로운 태양전지 설계와 세계 최고 효율에서의 돌파구를 훨씬 능가한다. 태양광발전 효율 모델에서 Li 등은 PV 성능 모델링을 장기 위성 관측 제한 표면 조사강도, 에어로졸

퇴적과 강수 속도와 결합시켰다 [21]. 이 모델은 이러한 효과가 PV 출력 생산에 미치는 글로벌 영향에 대한 긍정적인 이미지를 제공한다. 그림 5 는 대기 중 에어로졸과 오염으로 인한 PV 용량 인자(capacity factor: CF)의 평균적인 감소를 시각화한 것이다. PV 용량 인자는 "실제 연간 발전량을 1 년 내내 명판에 명기된 용량으로 PV 패널이 발전했을 때의 총 발전량으로 나눈 값으로 정의된다[21].

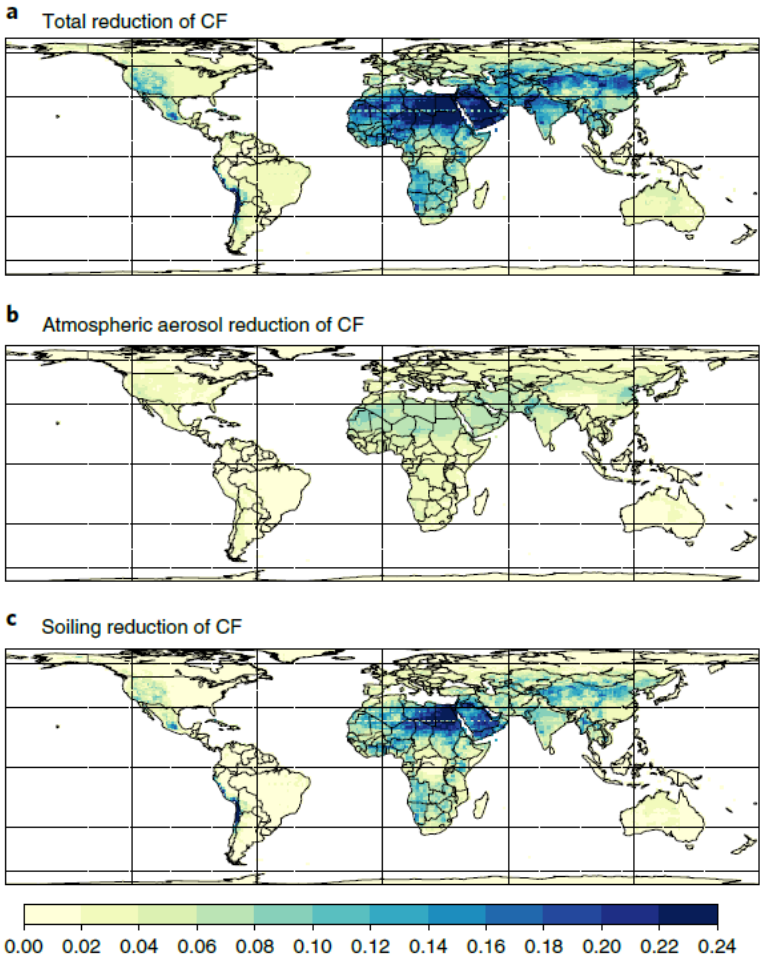


그림 5: 2003~2014 년 에어로졸로 인한 PV CF 의 평균 감소량. (a) 대기 중 에어로졸과 오염(PV 패널에 에어로졸 침전으로 인한)의 결합 효과를 보여준다. (b) 대기 에어로졸 단독으로 인한 영향 및 (c) 오염 단독으로 인한 영향을 보여준다. 대기 중 에어로졸 감쇠로 인한 영향은 오염의 영향보다 훨씬 적다는 것을 알 수 있다[21].

이러한 연구는 오염을 예방하거나 완화하는 것이 가치가 있음을 보여주지만, 좀 더 정확한 모델링을 필요로 하며, 현재는 서로 다른 연구자들에 의해 개발되고 있는 실정이다 (4.1 장 "오염 모델"). 모델링 노력 외에도, 오염 완화의 성배를 찾는다는 희망에서 유리 제품의 자체 청소와 오염방지용 광촉매 코팅을 포함한 오염방지 테크닉이 개발되었다 (6.1.2 장). 청소와 청소용 장치 시장은 6.2.1 장에서 논의한 바와 같이 특히 물이 부족하고 주변 온도가 높은 지역에서 로봇을 활용한 완전 건식 청소를 지향하는 강력한 추이에 따라 지속적으로 성장하고 있다.

2021 년 8 월 IPCC 기후변화 보고서(Climate Change Report 2021) 가 농업과 생태적 가뭄에 대한 인간의 원인 제공에 대한 요약과 함께 발표되었다 [22]. 그림 6 은 세계 여러 지역에서 가뭄 발생의 증가를 시각화한 것으로, 가뭄은 오염을 더욱 증가시킬 것이다.

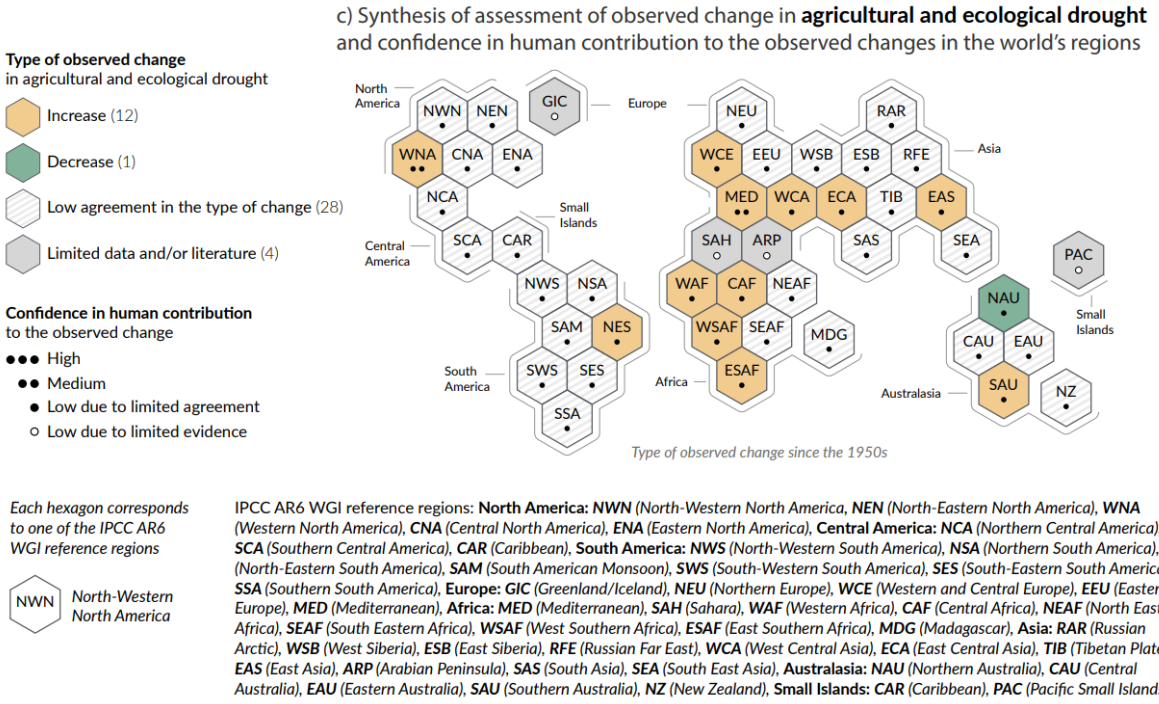


그림 6: 전세계 가뭄에서 관찰된 변화와 인간의 원인 제공, IPCC 보고서 2021 [22].

눈과 얼음은 먼지와는 현상학적으로 다르게 성능손실에 유사한 결과를 초래한다. 그리고 눈과 얼음은 기계적 부하 스트레스에 의해 야기되는 구성요소 신뢰성에도 높은 영향을 미치는 서로 다른 모델링, 완화와 시스템 설계를 필요로 한다. 7 장 (태양광시스템의 눈에 의한 음영)에서는 현재 태양광 분야에서의 눈 연구를 요약하였으며 캐나다의 사례 연구가 추가로 제공되어 있다.

2 오염의 물리적 및 화학적 원리

2.1 먼지의 물리적 및 화학적 특성

광범위한 리뷰와 과학 논문들이 도시와 사막 지역 먼지의 물리적 및 화학적 특성과 이들이 PV 플랜트에 미치는 영향에 대해 소개하였다 [12], [23], [24]. 이 절에서는 먼지 입자의 물리적, 화학적 특성, 그 모폴로지, 화학 및 조성에 대해 논의한다. 높은 조사강도 수준과 PV 플랜트 보급이 크게 성장하고 있는 사막 지역에 주로 집중할 것이다.

2.1.1 입자 크기

먼지 입자 크기는 PV 플랜트에 영향을 미치는 오염의 퇴적 메커니즘의 핵심적인 파라미터이다. 입자 크기는 그림 1 과 같이 10 의 몇 승의 범위에 걸쳐 달라질 수 있다. 입자 크기는 위치에 따라서도 다르다. 여러 연구들이 서로 다른 PV 설비에서의 먼지 입자 크기를 기술하였다. 먼지 입자 크기는 오염 특성과 관련이 있기 때문에 다양한 분야(PV 포함)에서 여러 연구가 발견되는데, 여기에서 입자 크기에 대한 중요한 정보를 찾을 수 있다.

주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy: SEM)은 일반적으로 0.2 μm 이상 크기의 입자 특성분석에 사용된다 [25]. Lawrence 와 Neff 는 입자 크기에 따른 분류를 제안하였는데, 여기서 입자는 점토(clay< 2 μm), 미세 토사(fine silt 2~20 μm), 굵은 토사(coarse silt 20~50 μm), 미세 모래(fine sand 5~125 μm) 그리고 중간 모래(medium sand 125~250 μm)로 정의된다 [26]. 그러나 모든 입자들이 오염에 기여하는 것은 아닌데, 500 μm 이상의 입자들에서는 관성이 중요 제약으로 작용하여 일반적으로 잘 떠오르지 않고 바람에 의한 영향을 적게 받는다 [27].

먼지 입자의 퇴적 메커니즘은 주로 입자 크기에 의존하는데, Mohan 은 먼지 입자 퇴적에 크기가 미치는 영향을 조사하였는데, 큰 입자들 (> 150 μm)은 매우 짧은 시간 동안에 공중에 머무는 것을 발견하였다. 중력은 큰 입자 (>10 μm)에 더 큰 영향을 미치는데, 그 이유는 작은 입자(< 1 μm)는 비에 의해 쉽게 제거되고 퇴적되지 않기 때문이다 [25].

2~63 μm 범위의 토사 크기 입자는 건조 및 반건조 기후에서 오염의 지배적인 요인이지만, 더 큰 입자는 더 센 바람에 의해 위로 올라갈 수도 있다 [23]. 칠레 아타카마 사막의 여러 사이트에서 수집된 먼지 분석 결과, 전체 입자의 98%가 50 μm 보다 작으며 평균 형상 인자(shape factor)는 1.2~1.5 이다 [28]. 토사 크기 입자는 해안 사막과 내륙 사막 지역 모두에서 지배적이다 [29]. 마찬가지로 카타르에서 PV 모듈 위 먼지의 크기는 10~30 μm 사이이다 [30].

다른 곳에서는 더 미세한 입자가 굵은 입자보다 PV 효율에 더 큰 영향을 미친다는 결론이 나왔으며 [31], 먼지 농도 4.25 mg/cm^2 의 경우에 최대 33%의 전류 감소가 예측되었다 [18]. 따라서 PV 성능에 가장 큰 영향을 미치는 먼지 입자의 크기에 대해 결론을 내리기는 어렵다. 많은 자연적인 매개변수가 입자 크기 범위에 영향을 미치고 물리적 특성은 위치와 심지어는 인간의 영향까지 받는다는 것을 보여주었는데, 왜냐하면 발표된 결과가 포획 방법론, 축적 표면(유리), 소스까지의 거리 등에 따라 달라지기 때문이다. PV 오염과 관련하여서는 수동, 반자동 또는 자동 청소를 포함한 완화대책 외에는 아직 해결책이 없다.

화학 조성

전세계적으로 유틸리티 규모와 소규모 PV 설비는 자연적인 소스 (예: 사막) 또는 광산, 산업, 농업 등과 같은 인위적인 활동으로 인해 오염이 된다. 따라서 바람에 날리는 먼지의 화학적 특성과 크기는 PV 어레이의 위치와 그림 1 에 나타낸 바와 같이 먼지, 바람, 중력 효과 등과 같은 자연 매개변수에 따라 크게 달라진다. 산업 분야 특히 건설 현장에서 나오는 입자에는 콘크리트, 유리섬유, 탄소섬유 및 벽돌 등이 포함된다. 자연적인 소스로는 꽃가루, 박테리아, 화산 배출 등 많은 것들이 포함될 수 있다. 도시로부터의 공급원에는 탄소, 오일 매연, 디젤 엔진 배가스 및 기타 오염물질이 포함될 수 있다. 오염원에서 발생하는 오염물질(pollution)은 오염의 양과 PV 시설 청소에 소요되는 작업에 영향을 미치는 중요한 인자이다 [32], [33].

먼지의 화학적 특성을 이해하기 위해서는 국지적(100 m) 스케일에서 지구적(수천 km) 스케일까지 크게 변하는 바람의 이동으로 인해 모래가 다양한 소스와 위치로부터 올 수 있다는 점을 고려해야 한다 [34]. 정확한 분석을 보장하는 한 가지 방법은 먼지 샘플을 수집하고 규격화된 프로토콜에 따라 분석하는 것이다. 이 정보는 O&M 계획에서 PV 플랜트의 청소 절차를 평가하고, PV 패널의 열화 과정에 대한 먼지의 영향을 이해하며 그리고 가장 중요하게는 출력 산출량 손실을 평가하는 데 사용될 수 있다.

먼지의 재배열, 응집(aggregate) 형성, 축적에 영향을 미치는 다양한 현상을 조사하고 있는 연구가 많다. 그러나 화학적 측면은 오염의 근본 원인임에도 불구하고 거의 논의되지 않는다.

이 장의 후반부에서는 케이킹(caking) 현상에 대해 기술한다. 요컨대, 작은 판상(platelet) 형태의 침입형(interstitial) 화합물은 입자와 유리 표면 사이의 공간을 채운다 (그림 9). 추가적인 세부 정보는 부록에서 확인할 수 있다. 아타카마 사막의 한 사례에서 이 작은 판상의 물질은 고령석(Kaolinite) 광물이었다 [35]. 다만, 이 광물 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 의 화학적 형성 과정은 설명되지 않았다.

석고(gypsum) $CaSO_4(H_2O)_2$ 와 Palygorskite(팔리고르스카이트) $(Mg,Al)_2Si_4O_{10}(OH)(H_2O)_4$ 또한 결정화된 강한 브리지를 형성한다. 이 응집 현상을 교결(cementation)이라고 한다. 그러나 이 광물의 형성이나 유리 표면의 일부 요소와의 상호작용은 자세히 설명되지 않고 있다. 이 장에서의 목적은 가능한 모든 화학식과 방정식을 나열하는 것이 아니라 먼지 축적을 유도하고 먼지 청소의 어려움을 증가시키는 주요 화학적 인자들에 대한 개요를 제공하는 것이다.

아래 절에서는 오염 과정에서 물의 지배적인 역할에도 초점을 맞춘다. 그것의 효과를 이해하기 위해서는 먼저 용해도(solubility)와 흡습성(hygroscopicity)이라는 두 가지 화학적 특성을 고려해야 한다. 용해도는 물질이 주변 매질로부터 물 분자를 끌어당기고 유지하는 능력에 해당한다. 흡습성 거동은 둘 중에 하나의 특성으로 나타나는데, 하나는 흡착(adsorption)으로 표면에 물 분자의 끌어당김과 유지이고 다른 하나는 흡수(absorption)로 물질 내부 기공으로의 침투에 의한 것이다. 일반적으로 PV 모듈에서 발견되는 먼지의 일부는 이온성 화합물의 특성을 가지는 소금으로 구성된다. 이러한 이온성 화합물의 대부분은 준안정성을 나타내며 물에 대해 상당한 용해도를 보여준다. 일단 용액에 들어가면, 그들은 음이온과 양이온 성분으로 분리된다. 이러한 이온성 구성요소 또는 요소들은 상호작용하여 새로운 불용성 화합물을 형성하며 물질의 안착과 경화를 야기하게 된다.

따라서 이 용해도 특성은 화학적 인자이다. 부록 1 은 용해도가 높거나 흡습성이 높은 일부 광물군을 요약한 것이다.

광물 식별

먼지의 광물학적 조성은 지리적 위치에 따라 크게 달라질 수 있다. 광물의 미세한 입자들은 대류권 수준의 바람을 타고 매우 먼 거리를 이동할 수 있다. 예를 들어, "엘니뇨" 기후 현상은 사하라 사막에서 가장 미세한 광물 입자를 상승시켜 대서양을 건너 유기 입자와 응집한 후 남아메리카 대륙으로 떨어져 아마존 열대 우림의 비옥화에 기여한다. 그러나 국부적인 상황 또한 이 광물 조성에 영향을 미칠 수 있다; 도시-산업 오염, 도로 교통, 광산 및 건설 현장 또는 집약 농업은 공기 중에서 입자를 생성하는데, 그 중 가장 무거운 입자는 불과 몇 미터 또는 몇 킬로미터만 이동한다. 부유 먼지의 조성을 분석하는 것은 복잡하고 시간이 많이 소요된다. 과학계에서 허용되는 단순화 가정은 이 조성이 지면 먼지 조성과 강하게 연관되어 있다는 것이다. 이 가정을 바탕으로 Engelbrecht 등이 수행한 전세계 60 개 이상의 다양한 지면 사이트에서 먼지를 수집하고 분석한 대규모 연구는 예상되는 광물 조성에 대한 좋은 개요를 제공한다 [36].

탄산염

Engelbreht 등의 조사에 따르면 전세계 공기 중 광물 먼지 질량의 62%가 북아프리카에서 배출되며, 15%는 아시아에서, 11%는 아라비아 반도에서 배출된다고 확인되었다.

예를 들어, 아타카마 사막에서 지면과 모듈 유리에서 채취된 먼지의 광물 조성은 조장석(albite: $NaAlSi_3O_8$), 회장석(anorthite: $CaAl_2SiO_8$), 방해석(calcite: $CaCO_3$), 홍연석(cristobalite: SiO_2), 석고(gypsum: $CaSO_4{\cdot}H_2O$), 암염(halite: NaCl), 석영(quartz: SiO_2), 백운모(muscovite: $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$) 와 정장석(orthoclase: $KAlSi_3O_8$)같은 다양한 광물을 함유하고 있었다 [28]. 같은 장소에서 수행된 또 다른 연구는 수집된 먼지가 석영, 석고/바사나이트의 황산염($CaSO_4{\cdot}2H_2O/2CaSO_4{\cdot}H_2O$), 조장석/장석류 및 극미량의 백운모, 각섬석(amphibole), 녹니석(chlorite), 적철석(hematite) 및 사녹니석(clinochlore) 과 같은 광물에 의해 형성되었음을 발견하였다 [23]. ATAMOSTEC 시설(아타카마 사막내의 사이트) 근처의 Yungay 에서의 또 다른 연구는 먼지가 주로 석영, 점토(일라이트 illite, 몬모릴로나이트 montmorillonite), 석고, 무수물, 사장석, 방해석, 정장석, 흑운모(biotite) 및 각섬석을 포함한다는 것을 발견하였다 [36].

유리 위의 먼지

먼지 용액은 표면 텍스처와 표면 영역에서의 분자 진동 상태에 변화를 야기하면서 유리 표면을 공격한다. 또한 표면 영역으로 칼륨이 확산되면 표면 경화가 일어나면서 유리의 표면 미세 경도가 증가하게 된다. 진흙을 제거한 후 유리의 광학 투과율은 감소하는데, 이러한 감소는 (i) 유리 표면을 청소한 후 잔류하는 진흙 잔류물과 (ii) 알칼리 및 알칼리토 수산화물의 공격으로 인한 유리 표면의 화학적 변화와 관련이 있다. 유리와 진흙 사이의 부착과 응집력은 유리 표면에 대해 이루어지는 마찰력보다 더 세다 [24].

오염에 영향을 미치는 거시적이고 제어 가능하며 미시적인 인자들의 개요가 제공되었다 [23] (그림 7 참조). 이 수치에 대한 자세한 논의는 부록 3 에 제공되어 있다.

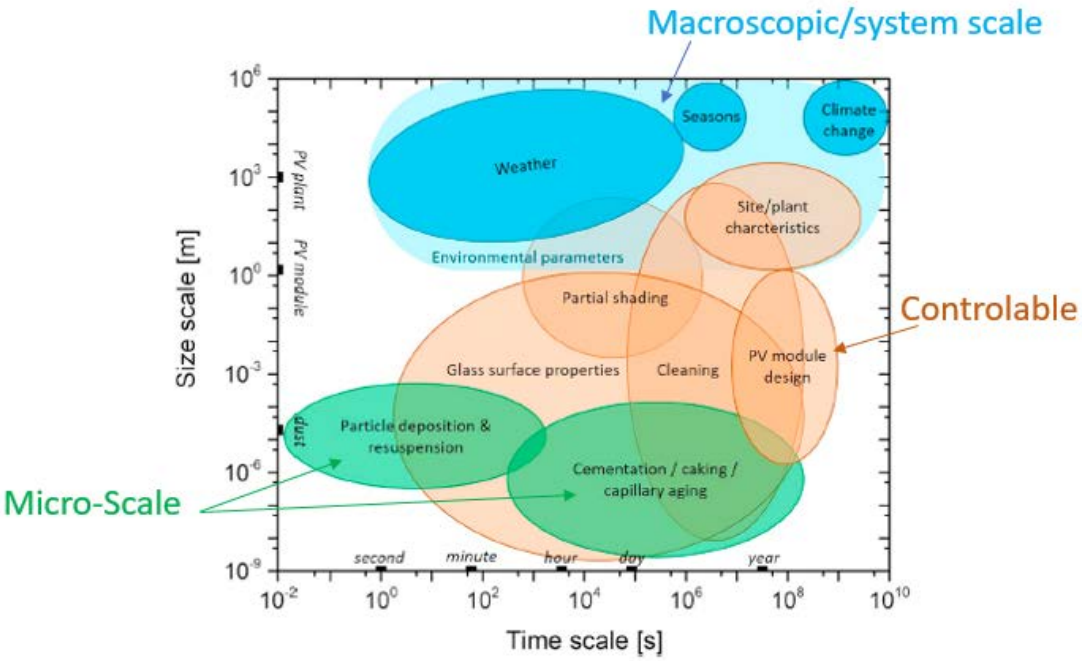


그림 7: 입자 크기와 퇴적 시간의 변화와 같은 많은 영향 인자들로 인한 오염 과정의 복잡성 [23].

미시적 수준에서 공기 중 먼지의 특성은 상당한 영향을 미친다. 크기 분포, 형상, 화학 및 광물학적 조성을 포함한 이러한 특성은 위치에 따라 크게 다를 수 있다. 오염은 대부분 직경 2~63 μm 의 공기 중 입자에 기인하는데, 큰 입자는 너무 무거워서 공기 중으로 올려져 이동할 수 없기 때문이다. 또한 공기 중 크기 분포와 PV 모듈에 퇴적된 먼지의 입자 크기 분포 사이에는 상관관계가 있는 것으로 추정된다. 특정 위치에 따라 광물 먼지 조성에 큰 차이가 있을 수 있으며, 특히 석영, 방해석, 백운석(dolomite), 고령석 또는 적철석과 같은 주요 구성 성분의 개별 비율에 관해서는 큰 차이가 있을 수 있다. 입자의 광물학적 구성은 광학적 거동과 해당 투과율 손실에 큰 영향을 미칠 수 있다 [12], [37], [38], [39]. 또한, 유리에 쌓인 먼지로 인한 광투과율 손실은 조사강도 수준과 입자 크기 분포에 따라 크게 달라진다 [40].

2.2 교결, 케이킹 및 캐필러리 에이징

물은 교결(cementation), 케이킹(caking), 캐필러리 에이징(capillary aging) 공통의 인자로, 이들 모두는 물리적, 화학적 반응의 결과일 수도 있고 단순히 물리적 결과일 수도 있다.

2.2.1 교결

높은 습도 또는 이슬점 이하 조건에서 퇴적된 먼지의 가용성 성분이 PV 모듈의 표면에 존재하는 물에 의해 부분적으로 또는 완전히 용해될 때 교결이 발생한다. 염화나트륨(NaCl)과 같은 일부 이온성 화합물이나 석고 ($CaSO_4(H_{20})_2$)와 같은 광물의 용해 외에도 PV 모듈 유리 자체에 포함된 규산염 및 탄산염의 가수분해도 포함할 수 있다. 이러한 가수분해는 탄산, 황산 또는 질산에 의해 촉진되는데, 이는 공기 중의 CO_2, SO_2 또는 NO_2 의

용해로 인해 실외 표면의 물 피막에 존재한다. 이러한 현상에 대한 자세한 내용은 다양한 문헌에 수록되어 있다 [41], [42], [43].

이후 건조 과정에서 용해된 물질이 침전되어 그림 8 과 같이 용해되지 않은 부분 또는 불용성 광물과 유리 표면 사이에 결정화된 고체의 브리지를 형성시키게 된다.

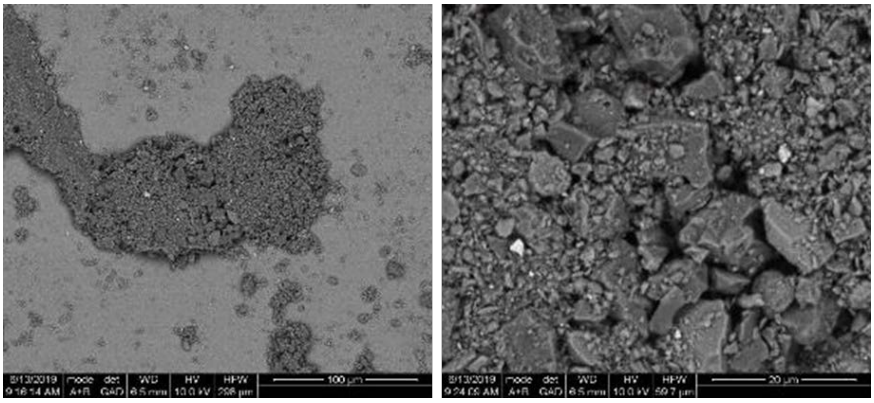


그림 8: 이슬 존재 하에서 유리 표면에 퇴적된 입자의 SEM 이미지, (좌) 저배율, (우) 고배율.

이러한 고상의 브리지는 입자 접착을 증가시킨다 [23], [5], [44], [45], [46].

2.2.2 케이킹

케이킹(점결)은 이슬 현상과 같은 습한 조건에서 입자가 부착될 때 발생하는 입자의 재배열, 응집 및 압축이다 (그림 9). 이러한 입자의 케이킹 과정은 칠레 아타카마 사막의 옥외에 노출된 유리 샘플에서 관찰된 바와 같이 오염 과정을 통해 실증될 수 있다 [35].

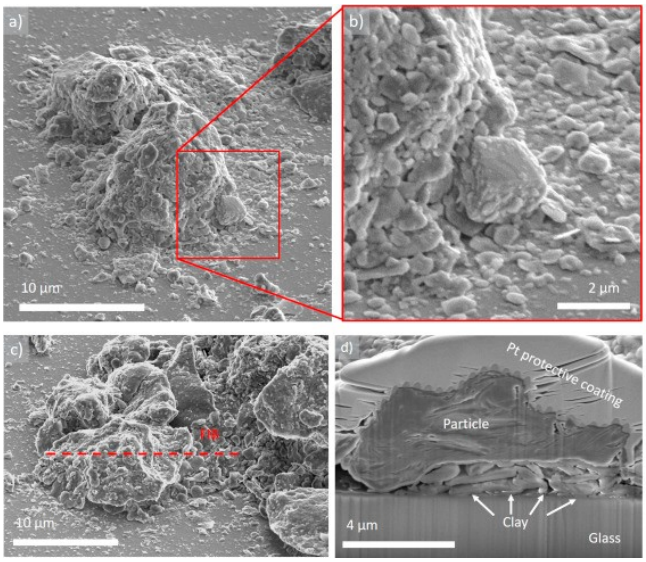


그림 9: 유리 표면에 케이킹된 더 큰 입자의 SEM 이미지[23].

2.2.3 캐필러리 에이징

입자와 표면 사이에 있는 액체 상태의 브리지가 건조될 때, 이에 해당하는 모세관힘이 입자를 표면 쪽으로 밀어붙여 유효 접촉 면적과 접착력이 증가하게 된다 [47]. 따라서 반데르발스력과 같은 접착력이 건조 후 크게 증가할 수 있다.

거시적인 이슬 형성이 탐지되지 않더라도 낮은 상대습도에서 모세관 응축으로 인해 입자와 표면 사이에 나노 및 마이크로 사이즈의 물 피막이 형성될 수 있기 때문에 캐필러리 에이징이 발생할 수 있다 [45].

2.3 이슬이 주도하는 오염 메커니즘

PV 모듈 위의 이슬 형성은 다양한 사막 지역에서 자주 보고된다 (그림 10). 이러한 현상은 PV 모듈의 복사 냉각뿐만 아니라 주변의 높은 습도에도 기인할 수 있다. 이러한 냉각은 태양광 유리의 적외선 방사율이 높기 때문이다.

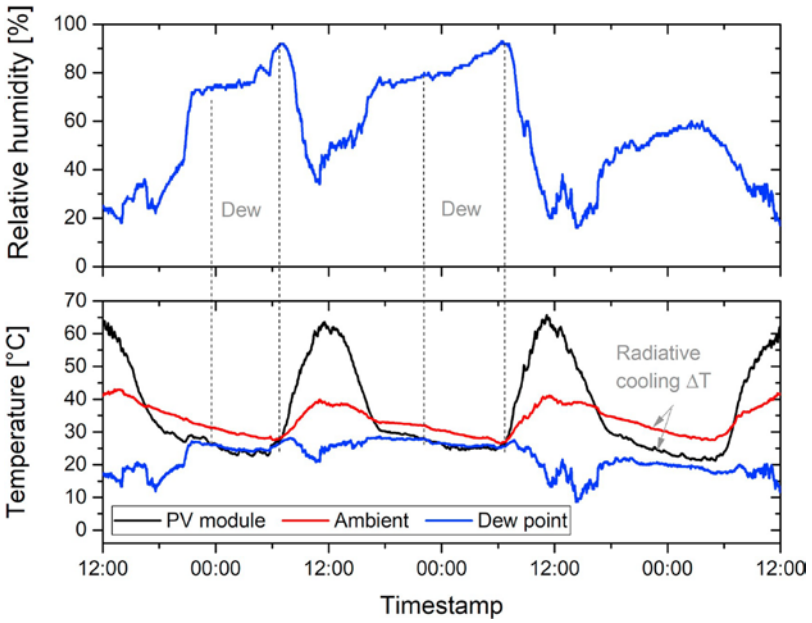


그림 10: 2015 년 10 월 Doha 에 있는 Solar Test Facility 에서 3 일 밤 동안 계산된 이슬점 온도와 주변 PV 모듈의 상대 습도와 주변 온도에 대한 전형적인 데이터 세트[23].

그림 11 은 아타카마 사막에서 온도에 대한 하나의 모델 데이터 세트를 보여주는데, 이는 밤에 PV 모듈의 앞 표면이, 특히 하늘이 맑은 동안 주변 온도 이하로 냉각된다는 것을 보여준다. 이러한 현상은 많은 문헌에 기술되어 있다 [1], [48], [49], [41], [23].

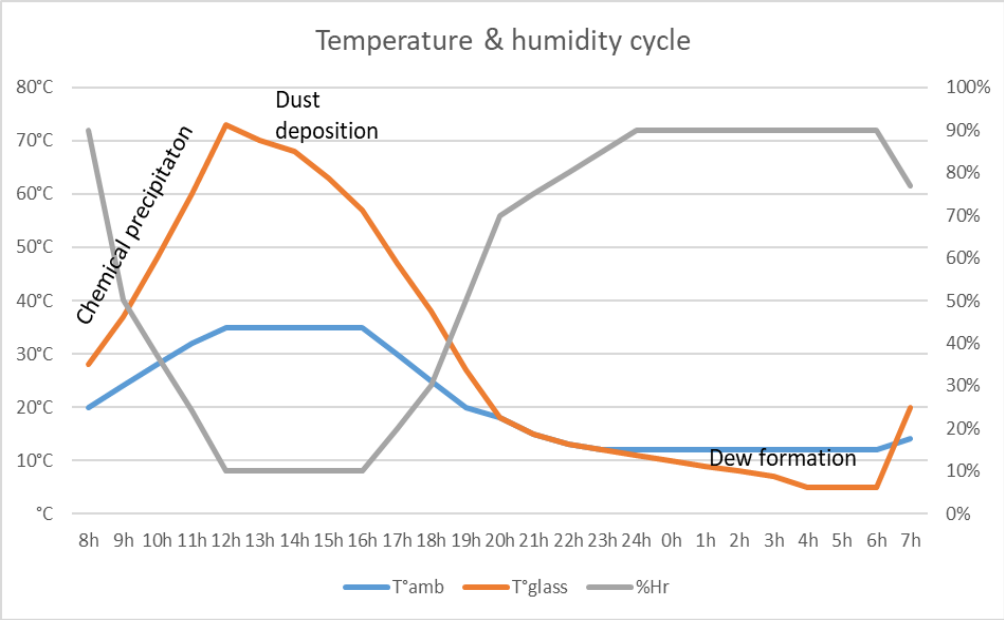


그림 11: 아타카마 사막에서 하루 온종일 온도와 습도 사이클의 시뮬레이션.

그림 11 에서 주변 온도(T_{amb})와 습도 측정 백분율(% Hr)은 1 년 동안의 각 시간에 대한 일일 측정의 평균이다.

모듈 유리 위의 온도(T_{glass})는 이 온도가 패널 내부에 있는 셀의 온도와 유사하다고 가정하여 계산한다.

$$T°glass = T°amb + \frac{NOCT - 20}{80} \times S \quad \textbf{(1)}$$

여기서

- NOCT 는 태양전지의 공칭 동작 온도(Normal Operating Cell Temperature: NOCT)로 PV 모듈 라벨에 명시되어 있다.
- S 는 어레이면에서의 태양 조사강도이다. 1 년 동안 각 시간별로 측정한 일일 조사강도의 평균 계산 값이다.

밤에 유리의 온도는 주로 복사 냉각 현상에 따라 달라진다. 프랑스 CEA-INES 는 여러 태양광 설비를 모니터링한 결과, 평균적으로 해가 진 직후에 유리의 온도가 급격히 떨어지면서 주변 온도보다 -3°C 낮게 나오고 일출 직전에는 더 낮아져 -7°C 까지 나온다고 보고하였다. 이 개략적인 모델은 기상학적 조건을 고려함으로써 개선될 수 있는데, 기상 조건은 하늘이 맑은 날의 특성과 복사 현상에 직접적인 영향을 미친다.

유리 온도가 이슬점에 도달하자마자 물은 그 위에 응축된다. 이 이슬점은 다음 식 (2)를 사용하여 계산될 수 있다:

$$Tp = \frac{b\left(\frac{aT}{b+T} + lnRH\right)}{a - \left(\frac{aT}{b+T} + lnRH\right)} \quad \textbf{(2)}$$

여기서

- a= 17.27, dimensionless
- b= 237.7 °C

- RH: 상대습도 [%]

응축수는 입자의 퇴적 속도를 증가시킬 수 있다. 게다가 PV 모듈 표면에 이슬이 맺히면 모듈 표면의 온도가 낮 동안 최고 수준에 달하여 증발될 때까지 물은 먼지 입자 및 유리 표면과 상호작용할 수 있다. 일시적으로 모세관힘을 증가시키는 것 외에도 물-입자 상호작용은 교결, 입자 케이킹 및 캐필러리 에이징 같이 영구적으로 증가된 입자 접착력으로 다양한 프로세스를 촉진한다.

2.4 오염에서 수분의 검토

이미 언급한 바와 같이, 오염은 상호 연관된 매개변수에 의해 지배되는 복잡한 현상이다. 입자 접착은 주로 모세관 현상, 케이킹 및 교결의 결과이다. 이러한 각각의 프로세스에서 수분은 핵심적인 역할을 한다. 일부 연구에서는 먼지 입자의 화학적 조성과 화학적 물리적 접착 메커니즘을 상호 연관시키려고 노력하였다. 이 장의 목적은 전체 오염 과정에서 수분으로 인해 발생하는 다양한 현상에 대한 개요를 제공하는 것이다. 다양한 접착력의 개요는 2.5 장에 제시되어 있다.

- 먼지 입자에 작용하는 중력은 입자의 질량에 따라 달라지는데 수분 침투로 인해 증가할 수 있다.
- 모세관힘은 수분이 있는 곳에서 발생한다. 얇은 층의 물이 모듈 표면을 덮고, 그 결과 발생하는 모세관힘은 표면 장력과 입자를 둘러싼 공기와 물 사이 압력 차이의 두 가지 조합으로 "물 메니스커스(water meniscus)를 유발한다. 결과적으로, 물의 모세관힘은 입자들이 모듈 표면에 부착되도록 한다.
- 반데르발스력은 상대습도가 매우 낮은 곳에서 우세하다. 반데르발스력은 원자간 인력에서 발생한다. 따라서, 원자간 힘이 먼지 입자와 표면 사이에서 발생하여 접착력을 증가시킬 수 있다. 물은 그 입자들 사이에서 물리적 장벽으로 작용하면서 발생하는 인력을 감소시키거나 심지어 상쇄시킨다.
- 정전기적 상호작용은 주로 공기 중 입자들 사이의 충돌에 의해 발생한다. 이들은 전하를 제공하여 정전기적 인력 또는 반발력을 생성한다. 공기 중의 수분이 적기 때문에 상대습도가 낮은 환경에서 정전 방전(Electrostatic Discharge: ESD)이 더 흔해진다. 일반적으로 공기 중의 수분은 정전기를 분산시키는데 도움이 된다. 물은 전도성이 있어 전기가 공기 중에서 자유롭게 이동할 수 있게 해주며 ESD 축적을 최소화한다.
- 케이킹은 물을 포함하는 메커니즘이다. 모듈 표면에 흐르는 물방울은 입자를 끌어 모아 응집체(aggregates)를 형성할 수 있다. 작은 입자들은 또한 더 큰 입자들 사이의 틈새를 채울 수 있다. 이로 인해 보다 응집력 있는 구조가 형성되고 작은 입자들이 표면과 큰 입자들 사이에서 "달라붙는(sticking)" 성분으로 작용한다.
- 교결은 먼지 접착을 설명하는 가장 많이 보고된 메커니즘의 하나이다. 화학반응은 먼지 입자를 결정화하고 덮는 새로운 화합물을 형성하면서 그들과 표면 사이에 단단한 브리지를 만들어 접착력을 획기적으로 증가시키게 된다. Ilse 등은 카타르의 오염 프로세스에서 광물 팔리고르스카이트의 주요 역할을 분석하고 확인하였다 [23]. 바늘 같은 형상의 팔리고르스카이트 (그림 12)는 용해 침전 프로세스의 결과일

것이다. 팔리고르스카이트는 먼저 응축으로 생성된 물에 용해된 후 물이 증발하면서 재결정화를 가능하게 한다.

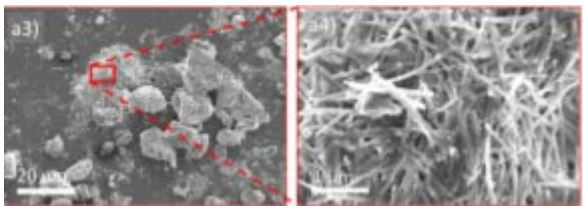


그림 12: 바늘 구조의 팔리고르스카이트, SEM 이미지 [50].

아타카마 사막의 한 지역에서도 교결 프로세스가 강조되었다 [29]. 이 연구는 석고 형태의 입자로 덮인 실리카를 가진 입자를 확인하였다. 석고에 의한 입자의 이러한 피복화는 먼지의 고정화를 증가시키고 오염을 촉진한다. 이 결과는 또한 팔리고르스카이트와 같은 용해-재결정화 프로세스를 제시하는데, 이는 단사정계 석고의 각기둥 형상에 의해 입증된다. 정확한 형성 프로세스가 불분명한 상태로 남아있지만 수분이 필수적인 역할을 하는 것은 분명하다.

2.5 입자 퇴적과 응집력의 개요: 반데르발스력, 모세관힘, 정전기력 및 중력

PV 모듈 표면에 먼지가 축적되는 속도는 다음 세가지 프로세스의 순 결과로 간주될 수 있다 [30]:

1. 퇴적(deposition): 표면에 충돌하는 대기로부터의 입자
2. 리바운드(rebound): 부착되지 않고 표면으로부터 즉시 되돌아 나옴
3. 재부유(resuspension): 이후 바람에 의해 다시 부유됨

$$Accumulation\ rate = Deposition\ rate - Rebound\ rate - Resuspension\ rate \quad \textbf{(3)}$$

입자의 퇴적은 대부분 중력(침강)과 난류성 기류(관성 퇴적)에 의해 제어된다. 풍속이 3 m/s 이상이면 입자의 퇴적 속도는 침강만으로 충분히 설명할 수 있다. 이 침강 프로세스는 식 (4)의 Stokes 침강 속도에 의해 대략적으로 모델링될 수 있다:

$$v_{Stockes} = \varrho d^2 g / 18\mu \quad \textbf{(4)}$$

여기서

- ϱ: 입자 밀도
- d: 입자 직경
- g: 중력 가속도
- μ: 공기의 dynamic viscosity

각 입자 크기 범주에 대한 플럭스 퇴적 속도는 해당 속도에 해당 크기 입자의 대기 중 농도를 곱하여 구한다. 입자의 리바운드에 널리 사용되는 예측 모델은 없다. 이론적으로 입자의 충돌 시 운동에너지가 입자와 표면 사이의 접착 작용을 초과할 경우 표면에서 리바운드가 될 것으로 예측된다. 따라서 입자가 크고 풍속이 높으며 습도가 낮은 경우에는 리바운드 비율이 더 높을 것으로 예상된다. 재부유(바람에 의한 입자 제거)의 경우

롤링(rolling), 슬라이딩(sliding) 및 직접 리프트오프(direct lift-off)의 세 가지 메커니즘이 고려된다.

일반적인 입자 접착력은 중요도가 감소하는 순서로 아래에 나열된 것들을 포함한다:

- 친수성(접촉각 = 0°) 및 소수성(접촉각 > 150°) 유리 표면 특성에 작용하는 모세관힘;
- 매끄럽고 거친 유리 표면에 작용하는 반데르발스력;
- 중력(구체의 무게);
- 볼츠만 평형에서 평균 입자 하전을 가정한 정전기력.

또한 강풍(10 m/s 이상 또는 36 km/h) 시 가능한 이탈 모드에는 다음을 포함한다

- 롤링(rolling)
- 슬라이딩(sliding)
- 리프트오프(lift-off)

놀랍게도, 모세관힘과 반데르발스 접착력과 비교할 때 중력과 정전기력은 생략할 수 있다. 또한 입자 크기에 따라 슬라이딩력과 롤링력이 상당히 증가한다는 결론을 내릴 수 있다. 입자의 직경이 50 µm 미만일 때 리프팅 힘은 무시할 수 있다.

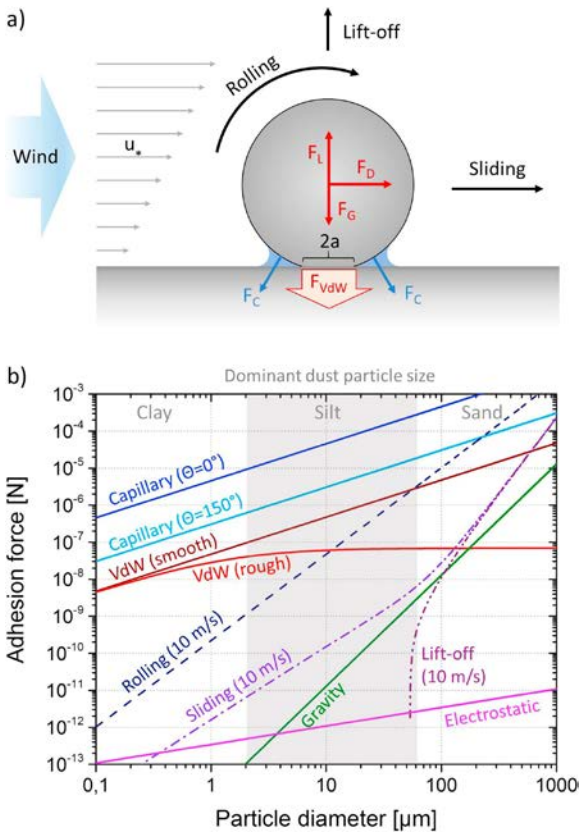


그림 13: a) 모듈 유리 위의 SiO_2 구체에 대한 입자 부착과 제거의 개략도 및 시뮬레이션. b) 부착력과 제거력(파선)은 입자 직경의 함수로 표시 [23].

거칠기의 크기 스케일은 매우 중요하다: 접착력을 줄이기 위해서는 요철이 입자 직경(약 10 의 3 승배)보다 훨씬 작아야 한다. 표면 거칠기가 입자 크기와 유사한 표면에서는 입자가 포획될 수 있다.

습한 환경에서는 침입형 물에 의한 하마커(Hamaker) 상수의 감소로 인해 반데르발스력이 상당히 감소한다.

기계적 연동과 같은 얽힘(entanglement)뿐만 아니라 화학적 결합을 포함하는 견고한 브리지 결합은 접착력 비교에서 배제되지만 (그림 13) 모세관 및 반데르발스력에 대해 주어진 값보다 수십 배 더 세다고 가정할 수 있다 [45]. 이런 견고한 브리지 결합은 다소 복잡한 화학적 상호작용을 포함하는 교결 현상에 필수적인 역할을 한다.

시뮬레이션한 힘의 범위는 10 μm 미만의 입자는 바람에 의해 거의 제거되지 않는다는 주장을 강력하게 뒷받침한다 [47].

3 오염과 눈 센싱

전세계적으로 오염은 PV 시스템의 출력과 에너지에 가역적인 손실을 야기하는 현장 고유의 문제이다. 적절히 대처하지 않으면 상당한 수입 손실로 이어질 수 있으며 최악의 경우 경제적 이익이 손실로 전환될 수도 있다. 비가역적인 PV 신뢰성 및 성능 문제와 달리 오염은 각 사이트의 특정 조건에 적응해야 하고 시간에 따라 변경될 수도 있지만 6 장에 기술한 여러 해결책을 통해 오염이 완화될 수 있다.

실제로 오염은 사이트마다 다를 뿐만 아니라 인근에 위치한 시스템에 대해 미치는 것과는 다른 영향을 보일 수 있고, 일부 상황 하에서는 동일 시스템의 다른 부품에도 다른 영향을 미칠 수 있다. 게다가 오염의 속도와 강우와 같은 자연적인 청소의 발생 빈도는 계절과 해에 따라 변할 수 있다. 이러한 모든 이유와 손실과 관련된 높은 경제적 가치 때문에 PV 플랜트의 오염 수준을 지속적으로 측정하고 모니터링하는 것이 중요하다. 이것은 상업적으로 이용 가능한 다양한 솔루션과 PV 플랜트의 출력 산출량 그리고 시간에 따른 변화의 모니터링을 통해 수행될 수 있다. 이러한 오염 센서의 측정은 가장 수익성이 좋은 청소 시간을 결정하는데 사용할 수 있다(6.3 장 참조).

이 장은 다음과 같이 구성되어 있다. 3.1 절에서는 오염이 PV 모듈 성능에 미치는 영향을 정량화하는데 사용되는 가장 일반적인 지표가 소개되어 있다. 3.2 절에는 현재 사용 가능한 오염 및 눈 센서의 목록이 소개되어 있다. 이상적으로, 오염은 성능비로부터 추출될 수 있지만, 이 경우에는 3.2.3 절에서 자세히 설명한 것처럼 조사강도에 미치는 오염의 영향이 추정되어야 한다.

3.1 오염 메트릭스

일반적으로 PV 시스템의 오염 프로파일은 오염 퇴적 기간의 교체와 청소 이벤트로 설명될 수 있다. 오염은 PV 모듈의 표면에서 일어나는데 그 속도는 입자 물질, 풍속 및 상대 습도와 같은 인자들에 의해 영향을 받으며(2 장), 오염은 비 또는 기타 자연적인 청소 이벤트에 의해 씻겨 나가게 된다. 이러한 이유로, 오염은 적어도 두 가지 메트릭스로 설명되어야 한다: 하나는 현재 손실을 정량화하는 것이고 다른 하나는 오염 퇴적 및 재부유로 인한 손실의 일일 변동을 설명하는 것이다. 첫 번째 메트릭스 (일반적으로 오염비라고 함)는 시스템의 현재 상태를 평가하는 반면, 다른 메트릭스 (일반적으로 오염 속도라고 함)는 청소 이벤트 패턴과 함께 가까운 미래의 손실을 예측하는데 사용될 수 있다.

오염비는 규격 IEC-61724 에 의해 청정 조건에서의 PV 어레이 출력 대비 오염 조건에서의 PV 어레이 출력의 비율로 정의된다. 이 값은 오염이 없는 상태에서는 1 이며, 오염이 축적되는 동안 감소하여 PV 모듈의 전기적 출력을 감소시킨다. 오염이 PV 셀에 도달하는 모든 빛을 차단하는 경우 오염비는 0 이 된다. 오염으로 인한 부분적인 손실(즉, IEC-61724 에서 "오염 수준"으로 정의된 오염 손실)은 1 에서 오염비를 뺀 값으로 계산할 수 있다. 오염비는 에너지 산출량에 대한 오염의 일일, 계절 또는 연간 영향을 표현하는데 사용되어 왔다. 또한 용도에 따라, 조사강도가 가장 강한 기간 동안 발생하는 오염이 더 큰 영향을 미치도록 조사강도 가중 평균으로 계산되었다. 문헌에서 오염비와 유사한 지수를 찾을 수 있는데, "청결 지수(cleanness index)", "오염 인자(soiling factor)" 또는 "오염 손실

인자(soiling loss factor)"가 여기에 포함된다. 계산에 사용되는 데이터는 다를 수 있지만 모두 동일한 개념(즉, PV 장치의 실제 출력과 예상 출력을 비교)에 기초한 지수들이다.

오염의 전기적 영향은 입사각과 빛의 구성 요소의 변화 때문에 하루 중 시간에 따라 변화한다 (그림 14) [13]. IEC-61724 는 태양 정오 2 시간 이내 (PV 장치가 고정식인 경우) 또는 입사각 < ~35º (PV 장치가 추적식인 경우)에서 오염을 측정할 것을 권장한다. 하루의 중앙 시간만 고려하는 것은 또한 정렬 오류와 아침 또는 저녁의 음영으로 인한 잠재적 바이어스를 제한하기 위해서다 [51], [52]. 한편, 일부 연구자들은 24 시간 데이터를 사용하고 있는데, 이 접근방식은 PV 모듈 에너지 산출량에 미치는 오염의 영향을 보다 직접적으로 측정할 수 있기 때문이다 [53].

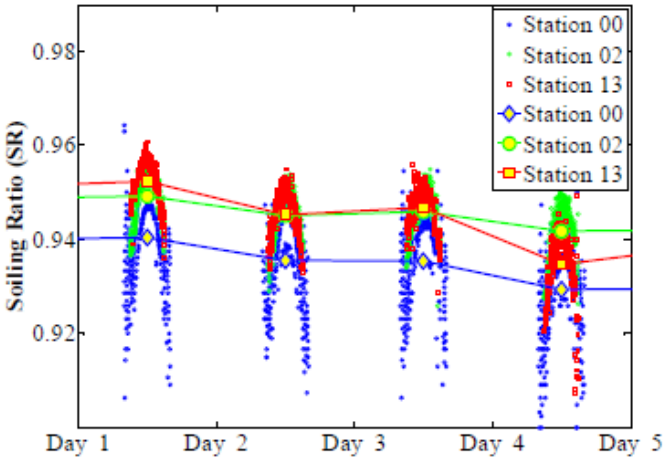


그림 14: 1 분 단위로 기록된 오염비의 시간 변화. 일 평균 값은 큰 마커로 표시됨 [51].

대부분의 경우, 오염비는 에너지 또는 출력 산출량으로부터 계산되는 대신 오염된 PV 소자와 기준 PV 소자의 단락전류의 비율로 근사할 수 있다. PV 모듈의 모든 셀이 균일하게 오염된 경우, 온도 보정된 단락전류는 출력에 비례한다. 그러나 가벼운 강우나 응축으로 인해 경사진 모듈이 부분적으로 청소되면서 모듈의 맨 아래 줄에 오염이 쌓일 수 있다. 이 경우 오염은 PV 모듈 I-V 곡선의 형상에도 영향을 미쳐 서로 다른 요인에 의해 단락전류와 최대 출력이 감소하게 된다. 특히, 오염이 균일하게 분포되지 않으면 단락전류 측정은 PV 출력에 미치는 오염의 실제 영향을 과소평가할 수 있다. 이러한 과소평가는 오염된 셀의 하나의 스트링이 바이패스 다이오드에 의해 개방된 상태가 되면 출력 손실로 이어지지만 그림 15 와 같이 모듈의 단락전류 변화로 이어지지는 않는다 [54].

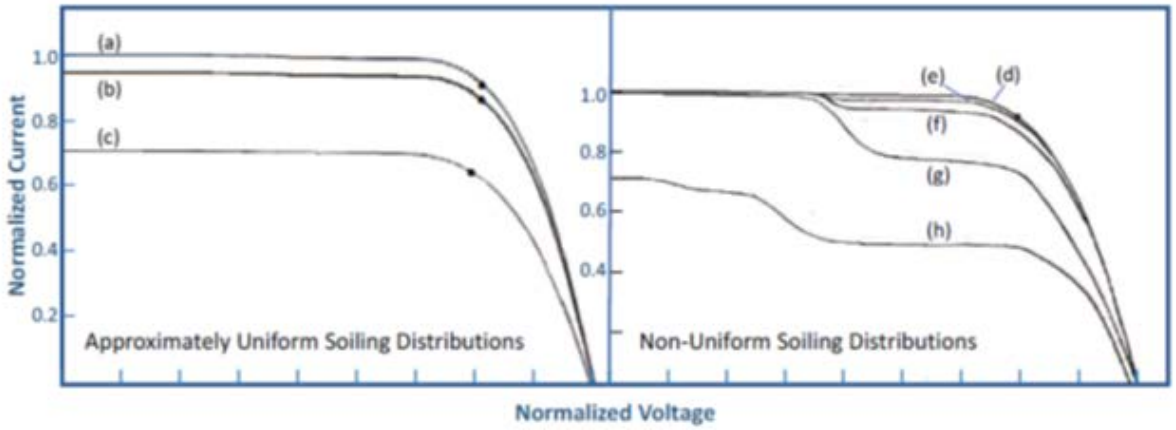


그림 15: 여러 가지 오염 조건에서의 I-V 특성과 결정질 Si 모듈의 패턴 [55]. (a)와 (d)는 청정 조건; (b)와 (c) "균일한" 오염 조건; (e)와 (f) 프레임의 측면과 바닥 부분의 불균일한 오염; (g) 측면과 모서리의 높은 불균일한 오염; (h) 가장자리에 높은 수준의 축적이 있고 모듈 중심 가까이의 여러 셀을 덮고 있는 얼룩.

오염 분석에 사용되는 두 번째 일반적인 메트릭스는 오염비로, PV 모듈 표면에 오염이 축적되는 동안 오염비의 일일 변화를 설명한다. %/day 로 표시되며 일반적으로 음수로 보고된다. 0 %/day 는 오염비가 변하지 않음을 나타내며, 일반적으로 오염이 퇴적되지 않을 때 발생한다. 오염비 프로파일이 가파를수록 오염율의 절대값이 높아진다. 비록 일부 연구자들은 오염 손실 프로파일이 지수 함수를 따르거나 [56] 다중 선형 함수를 통해 보다 정확하게 모델링될 수 있다고 제안하지만, 일반적으로 오염율은 청소 이벤트 사이에 일정하다고 가정한다.

오염율을 계산하는 가장 통상적인 방법은 청소 이벤트 사이에 오염 프로파일의 기울기를 결정하는 것으로 이는 최소자승 회귀(least-square regression)법을 사용하여 수행할 수 있다 [57]. 그러나 이 접근방식은 이상치(outliers)와 반영되지 않은 청소 이벤트에 의해 잠재적으로 편향되는 것으로 밝혀졌다. 이 문제를 극복하기 위해 이전 연구에서 사용된 Theil-Sen 추정기(estimator)와 쌍자승(bisquare) 가중 최소-자승 회귀 분석법이 이용되었다 [58], [59]. 게다가, Deceglie 등과 Besson 등은 제한된 수의 데이터 포인트로 추세 피팅하는 것을 피하기 위해 최소 14 일 동안 청소 이벤트가 없는 기간에 대해서만 오염율 계산을 제안하였다 [58], [59]. 문헌에서는 오염율에 대한 대안으로 청결 지수의 변화와 같은 메트릭스를 사용하고 있다 [53].

대부분의 경우 각 PV 사이트에 대해 하나의 단일 오염율이 확인되며 이는 연중 일정한 것으로 간주된다. 이 값은 가장 긴 건조 기간의 오염율 [57] 또는 모든 건조 기간 기울기의 중간값 [58]으로 결정될 수 있다. 그런 다음 이 값을 강우 또는 자연적인 청소 이벤트 패턴과 함께 사용하여 조사 사이트의 오염 손실 프로파일을 생성할 수 있다. 최근, 사이트에서 오염의 특성분석과 그 계절성을 개선하기 위한 방법으로 각 건조 기간의 길이에 따라 가중된 월간(연간이 아닌) 오염율 또는 적어도 연 평균 오염율의 계산이 제안되었다 [60].

3.2 오염과 눈 센서 시장의 개요

3.2.1 오염 모니터링

그림 2 와 같이 오염에는 뚜렷한 계절적 변화가 있다 [61]. 따라서 일년 내내 지속적으로 오염을 모니터링하는 것이 타당하다. 위치와 환경적 인자들이 대기 중의 입자 농도와 그에 따른 먼지 퇴적이 일년 내내 어떻게 변화하는지를 결정한다. 다양한 유형의 먼지가 서로 다른 스펙트럼의 빛을 투과하기 때문에 서로 다른 위치가 오염의 수준에 영향을 미칠 수 있다 [30]. 위치의 오염 조성은 모듈 표면의 먼지 유형과 광 투과 스펙트럼에 기여한다. 세계의 일부 지역은 다른 지역보다 평균 오염율이 더 높을 것이다. 이는 주로 지배적인 기후 조건에 기인하며, 더 건조한 지역은 오염율이 더 높을 가능성이 있다 [62].

문헌 조사의 핵심 메시지 중 하나는 오염율이 계절뿐만 아니라 장소마다 크게 다를 수 있다는 것이다. 예를 들어, 미국에서 농업 비중이 높은 지역의 오염율은 월간 11.5 %까지 높을 수 있다 [63]. 농업 지역의 오염율이 자연적인 사막보다 현저히 더 높은데, 이는 인간의 활동과도 관련이 있다.

표 1: 월간 오염율 (%/월) [63].

지역 유형	겨울	봄	여름	가을
자연 사막지	0-1.2	0.8-2.0	0.9-1.1	0-1.0
건조 농업지	0.3-3.6	1.3-5.5	2.2-10.9	0-11.5

대부분의 오염 연구는 상당히 짧은 며칠에서 몇 년에 걸쳐 이루어진다 [64]. 이러한 데이터는 PV 모듈의 오염에 계절적 변화가 있음을 나타낸다. 오염율을 예측할 때 연간 또는 심지어 월간 평균 오염 데이터로는 정확도를 확보하기에 충분하지 않을 수 있다는 점에 유의해야 한다. 문제를 더 복잡하게 만드는 것은, 오염율이 어레이 내에서 심지어는 단일 모듈 내에서도 불균일 할 수 있다는 것이다 [64]. 예를 들어, 상부 랙의 모듈은 평균적으로 오염이 더 잘되는 경향을 보이는데, 더 아래쪽의 모듈은 상부 랙의 모듈로부터 흘러 내리는 빗물을 받기 때문이다. 바람의 방향은 오염의 패턴에 직접적인 영향을 미치는데, 그림 16 의 고르지 못한 오염은 칠레 아타카마 사막의 경우로 지배적인 풍향의 영향을 입증하고 있다 [30].

그림 16: 지배적인 바람 방향을 입증하는 오염 패턴.

더 큰 규모의 PV 플랜트를 대상으로 한 다른 연구도 이러한 고르지 못한 오염율을 뒷받침하고 있다. 한 플랜트의 상대적인 출력 감소는 0.89~0.95 범위이다 [51]. 동일한 사이트의 서로 다른 위치에서도 오염의 퇴적 속도가 지배적인 바람 상태와 먼지 소스의 분포에 따라 1.5 배와 2 배 사이에서 달라질 수 있다 [4].

그림 17: 대규모 PV 플랜트에서 고르지 못한 출력 감소를 보여주는 데이터 [51].

하나의 PV 플랜트 전체에서 오염율의 분포가 고르지 못한 경우에는 정확한 결과를 얻기 위해 사이트 주변에 여러 개의 오염 스테이션을 배치하는 것이 좋다. 규격 IEC 61724-1 은 용량이 5 MW 보다 크고 연간 예상 손실이 2 % 이상인 PV 사이트에 대해 최소 하나 이상의 오염 센서를 권장한다. 오염 스테이션의 데이터를 매핑하고 공간적으로 평균화하여 사이트에 대한 메트릭스를 제공할 수 있으면 이를 향후 오염율을 예측하거나 운영자에게 PV 시스템을 청소하기 위한 최적의 시간을 알리는데 사용할 수 있다.

3.2.2 오염 센싱 기술

오염 센서는 오염 손실의 측정을 위해 특별히 설계된 장치이다. 현재 사용되고 있는 오염 센싱 방법은 모듈의 전류나 출력을 측정하는 전기적 기법과 센서 표면에 누적된 먼지로 인한 반사율이나 투과율 손실을 측정하는 광학적 기법으로 나눌 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 오염 정량화는 오염된 상태와 청결한 상태에서의 전기적 산출량의 비교를 기반으로 한다. 전기적 방법은 나란히 놓인 2 개의 PV 소자의 전류 또는 출력 산출량을 측정함으로써 이루어진다. 여기서 하나의 소자는 정기적으로 청소되고 다른 하나는 정상적으로 오염된 것이다. 표 2 에서 보는 바와 같이, 일부이긴 하지만 제조업체로는 Atonometrics, Campbell Scientific, NRG Systems 이 있다. 전기적으로 두 개의 기준 태양전지(셀), 두 개의 모듈 또는 하나의 셀-모듈 조합으로 구성될 수 있다. 동일한 기준 셀 방법은 랙킹 요건이 최소화되어 있어 상대적으로 비용이 저렴하다. 그러나 전면 커버 유리가 다를 수 있어 기준 셀과 모듈은 동일한 방식으로 오염되지 않을 수 있다. 예를 들어, 텍스처 처리된 커버 유리가 일반 유리보다 최대 7% 더 오염된 것으로 최근 연구에서 나타났다 [65]. 대조적으로 일부 반사방지 코팅은 지리적 조건에 따라 오염을 60 %까지 줄일 수 있다 [66]. 또한, 오염된 기준 셀은 모듈 표면에서 발생할 수 있는 불균일한 분포를 잡아내지 못할 것이다. 또는 모듈-모듈 구성을 사용하는 오염 시스템은 균일하지 않은 오염은 반영하지만 자동화된 방법이나 현장 요원에 의해 하나의 모듈을 정기적으로 청소해야 하기 때문에 더 높은 유지보수 비용을 초래할 수 있다. 대조적으로, 셀-모듈 구성을 사용하는 오염 시스템은 기준 셀의 간단한 자동 청소를 가능하게 하면서도 불균일한 오염을 반영하고 전체 어레이를 대표할 수 있는 모듈을 갖게 되는 이점이 있다. 대부분의 오염 퇴적은 밤에 발생하는 것으로 밝혀졌기 때문에 기준 소자는 매일 아침 청소하는 것이 바람직하다 [23]. 그러나 실제로는 청소가 완전히 자동화되지 않은 경우 기준 소자를 매주 청소하는 경우가 많다. 오염 센서의 청소에 따른 비용과 편익을 평가할 때 부적절한 청소 빈도가 오염비를 크게 과소평가할 수 있다는 점이 고려되어야 한다 [67].

오염 센서 구성이 셀-셀, 모듈-모듈, 셀-모듈 중 어느 것이든 간에, 또 다른 중요한 고려 사항은 단락 전류만 측정할 것인지 아니면 출력도 함께 측정할 것인가 이다. 실제로, 앞에서 언급한 바와 같이, 불균일한 분포는 단락전류의 변화와 비교하여 균형이 맞지 않는 출력 손실을 야기할 수 있고 충진율(fill factor)을 감소시키며, 심지어는 잠재적으로는 PV 셀을 영구적으로 손상시키는 열점의 발생으로 이어질 수 있다 [64], [68]. 따라서 전기적 측정에 기초한 오염 스테이션은 불균일한 오염의 복잡성에 대응하는 측면에서 이상적으로는 단락전류와 출력 데이터를 모두를 수집해야 한다.

일부 오염 시스템은 모듈 또는 기준 셀의 사용 측면에서 다르지만, 일반적인 단락전류 측정 방법은 동일하다: 모듈 뒷면 온도 측정과 함께 온도 보상 단락전류를 사용하여 IEC 60891 Ed. 2 [69]에 설명된 방법을 사용하여 유효 조사강도를 결정한다. 열화를 최소화하기 위해 측정 사이에는 청결한 소자와 오염된 소자를 개방회로로 유지할 수 있다. 일반적으로, 계산은 청명일 하루 중의 중앙 시간대에 유효 조사강도가 500 W/m^2 이상일 때만 수행된다. 이는 천정각, 에어매스, 스펙트럼 차이의 영향을 최소화시킨다. 기타 필터링 테크닉으로, 통과하는 구름으로 인하여 단락전류의 변화 속도가 높을 때의 데이터는 제외하는 것이 포함된다 [70]. 오염비는 각각 α_1과 α_2 의 단락전류 온도계수를 갖는 청결 소자와 오염 소자의 단락전류

I_{sc1}과 I_{sc2} 를 사용하여 계산한다. 첨자 M은 오염 시 측정한 값을 나타내며, M'은 교정 시 측정한 값을 나타낸다 [71].

$$SR = \frac{I_{sc2,M}\left(1-\alpha_2\left(T_{2,M}-T_{ref}\right)\right)}{I_{sc1,M}\left(1-\alpha_1\left(T_{1,M}-T_{ref}\right)\right)} \cdot \frac{I_{sc1,M'}\left(1-\alpha_1\left(T_{1,M'}-T_{ref}\right)\right)}{I_{sc2,M'}\left(1-\alpha_2\left(T_{2,M'}-T_{ref}\right)\right)} \quad (5)$$

여기서

- SR : 분광응답(Spectral Response)
- $I_{SC1,M}$: 청정 소자 단락전류, 오염시
- $I_{SC2,M}$: 오염 소자 단락전류, 오염시
- $I_{SC1,M'}$: 청정 소자 단락전류, 교정시
- $I_{SC2,M'}$: 오염 소자 단락전류, 교정시
- α: 온도계수(Temperature coefficient)
- T: 해당 온도로 일반적으로 T_{ref} 25°C

출력 온도계수를 사용하여 오염비에 대한 비슷한 방정식을 세울 수도 있는데, 이 때 단락전류를 청결 소자와 오염 소자의 출력 산출량으로 대체하게 된다.

또한, 오염 측정 사이에 일어날 수 있는 열화를 최소화하기 위해 모듈에 연결되는 부하는 열화 속도에 상당한 비선형적 효과를 나타내며 특정 기술에 한정적이다. 다중 및 단결정 실리콘 모듈은 최대 출력점에서 계통연계 작동에 비해 개방회로 하에서 열화 속도가 감소함을 보여준다 [72]. 이와는 대조적으로, a-Si 와 CdTe 같은 박막 기술은 계통연계 조건에 비해 개방 회로 하에서 더 높은 열화 속도를 보여준다.

전기적 측정과 달리, 광학적 방법을 이용하는 먼지 센서는 Kip, Zonen 및 Atonometrics 가 공급하고 있다. Kip and Zonen 의 Dust IQ 센서는 펄스형의 청색 LED 를 사용하여 먼지 입자에서 반사된 산란광을 측정한다. 투과 손실은 단락전류 및 출력에서 등가 손실로 변환된다. 그러나 먼지의 산란 특성은 시험 위치에 따라 다르다. Dust IQ 는 초기에 Arizona 석영 먼지(quartz dust)로 보정되지만 투과 손실이 5~10 % 사이가 될 때까지 사이트에서 먼지가 축적되도록 두어 사이트 고유의 오염 조건에 맞게 재교정해야 한다. 광 다이오드 외에도 Dust IQ 교정에는 태양 정오 2 시간 이내에 청결 소자와 오염된 조건하의 소자의 단락전류를 측정하는 작업이 포함된다 [75]. 대체 광학적 방법은 Atonometrics 의 Mars 오염 센서에 의해 제공된다. Mars 소자는 오염으로 인한 투과 손실을 계산하기 위해 센서와 이미지 프로세싱 소프트웨어를 사용한다. 센서는 디퓨저 뒤에 위치하며, 커버 윈도우는 자체 교정을 위해 내부 표면에 흑과 백색 마크가 있다. 오염 시스템을 제공하는 공급업체는 표 2 와 같다.

표 2: 오염으로 인한 손실을 정량화하는 데 사용할 수 있는 여러 제품의 부분 목록. 제조업체들의 소개는 알파벳 순서이다. 이 보고서의 모든 장비 가격은 2019 년 추정치이다. 정확한 비용은 제조업체에 문의해야 한다.

오염 센서 (Soiling Sensors)					
제조업체	Atonometrics	Atonometrics	Campbell Scientific	Kipp and Zonen	NRG Systems
모델명	Soiling Measurement System	Mars Soiling Sensor	CR-PVS1	Dust IQ	Soiling Measurement Kit
방법	Short-circuit current and power	Optical (image processing camera)	Short-circuit current	Optical (LED)	Short-circuit current
모듈 출력 범위	Up to 450 W	Not applicable	Up to 300 W	Not applicable	3 panels of 15 W each
공급 전원	10 to 30 VDC or 100 to 240 VAC	10 to 30 VDC	16 to 32 VDC	12 to 30 VDC	5 to 15 VDC
출력 옵션	Ethernet	RS-485, Ethernet	RS-232	RS-485	Available upon request
근사비용: Euro / USD	€ 6078 / $ 6900	€ 2600 / $2950	€ 2334 / $ 2649	€ 3807 / $ 4320	Available upon request

측정 정확도 측면에서 다양한 오염 센싱 제품의 측정 불확도를 정량화하기 위한 더 많은 연구가 필요하다. 특히 오염 센싱 제품이 다양한 소자에 대한 표준 및 확장(expanded) 불확도를 참조하는 측정 불확도의 국제적 지침(International Guidelines of Uncertainty in Measurement)을 참고로 한다면 매우 유익할 것이다. 단락전류 오염비의 경우, 청결 셀과 오염된 셀이나 모듈 모두 기준 PV 소자로 동시에 교정할 수 있다. 이처럼 오염비 정확도는 단락전류, 온도(모듈 후면과 셀 사이의 차이) 및 단락전류 온도계수의 불확도에만 의존한다. 이러한 불확도 외에도 청결 모듈과 오염된 모듈은 정확히 동일한 평면 위에 위치하지 않을 수 있어 경사각 및 방위각 정렬 오류를 초래할 수 있다. 입사각이 작은 태양 정오로부터 몇 시간 이내에 측정을 함으로써 방위각과 경사각의 정렬 불량을 최소화할 수 있다. 그리고 정오에 발생하는 오염비의 부호 변화를 이용하여 태양 정오 바로 직전과 직후의 데이터를 평균화함으로써 방위각 불일치를 최소화할 수 있다. 또한 현장에 기반한 교정은 단락전류 온도계수의 불확도 기여를 최소화하기 위해 실제 작동 온도에서 이루어져야 한다. 데이터의 신중한 교정과 필터링을 통해 단락전류 오염비 측정은 약 ± 1%의 불확도를 가질 수 있는 것으로 나타났다 [71]. 출력을 측정할 때는 셀-모듈 또는 모듈-모듈 구성에서 가장 정확한 측정(1~2% 불확도)이 가능하다. 셀-모듈 또는 모듈-모듈 구성에서의 단락전류 측정은 불균일한 오염을 고려하지 않기 때문에 정확도가 떨어진다(약 3~5%). 가장 정확하지 않은 방법(약 4~7%의 불확도)은 셀-셀 구성에서의 단락전류와 광학적 방법인데, 어레이와는 다른 커버 유리를 사용할 수 있고 불균일한 오염을 반영하지 못할 것이기 때문이다. 그럼에도

불구하고, 셀-셀 구성과 광학적 방법은 가장 비용이 적게 들고, 간단한 설치와 다중 측정 포인트가 가능하며 유지보수 비용이 거의 또는 전혀 들지 않는다. 단, 이 보고서에 기술된 다양한 오염 센서에 대한 불확도의 크기는 추정치 [76]이며 기준 소자의 청소 간격이 오염 측정에 바이어스를 일으킬 수 있다는 점이 강조되어야 한다 [67]. 이러한 수치를 보강하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

3.2.3 조사강도 센서의 오염 특성

조사강도 센서는 오염될 수 있다. 이 절에서는 특징적인 돔 형태의 표준 일사량계의 오염율을 평판형 표면을 가진 기준 셀의 오염율과 비교한다. 센서 유형에 관계없이 국제 규격 IEC61724 는 조사강도 센서를 매주 청소할 것을 권장한다 [77]. 어레이면(POA) 조사강도 센서를 청소하고 유지하는 한, 온도 보정 성능비는 건기 동안의 오염율과 오염 손실을 정확하게 추정할 수 있다. 조사강도 센서의 단기 안정성이 적절한 범위에서는 오염 센서의 절대적인 불확도는 무관하다.

오염 손실은 먼지 조성, 지역 기후조건과 노출시간에 따라 달라진다. 또한 오염 손실은 경사각도에도 의존한다 [78], [79]. 오염 손실은 일반적으로 주어진 위치에서 경사각이 증가함에 따라 감소하는데, 이는 적어도 바람이 먼지를 제거하는 데 중요한 역할을 하지 않는 지역에서는 표면의 유효 면적이 천정각과 중력에 비례하여 감소하기 때문이다. 유효 표면적의 감소는 입사각으로 인한 조사강도의 코사인 손실과 유사한데, 이는 직달광에 의해 보이는 바와 같이 모듈 유효 면적의 감소를 수량화한다.

경사각도는 어느 정도는 조사강도 센서의 오염율에도 영향을 미칠 수 있다. 조사강도 센서에는 두 가지 기본 표면 형상이 있다. 기준 셀은 일반적으로 평판 유리 아래에 패키지된 실리콘 소자로 구성되며, 일사량계(pyranometer)는 일반적으로 단일 또는 이중 돔 유리 아래에 패키지된 서모파일(thermopile) 센서로 구성된다. 기준 셀의 오염율은 유리 코팅이 유사하다고 가정할 때 PV 모듈을 포함한 다른 유리 표면의 오염율과 비슷해야 한다. 그러나 주어진 돔 형상을 고려할 때 경사각도가 일사량계의 오염율에 미치는 영향은 다를 수 밖에 없다. 돔 형상은 중력에 대비하여 모든 경사각도에서 가능한 가장 좁은 수평 면적을 가지기 때문에 이론적으로 일사량계 위의 오염율은 더 낮아야 한다.

평판형 소자와 비교하여 일사량계의 더 낮은 오염율을 뒷받침하는 두 개의 발표논문이 있다. 미국 서부에서 실시된 한 연구에서, 일사량계의 오염율은 모듈의 오염율보다 50% 낮은 것으로 측정되었다 [80]. 이것은 일사량계와 기준 셀 간의 직접적인 비교는 아니지만, 평판형 기준 셀의 오염율은 유사한 표면 코팅 및 메트릭스를 고려할 때 모듈의 오염율과 유사해야 한다. 오염율은 메트릭스의 선택, 즉 단락전류(I_{sc}) 대 최대출력 전압(P_{mp})에 따라 달라지기 때문에 기준 셀과 일사량계의 직접 비교는 기준 셀의 I_{sc} 를 기반으로 해야 한다. 다른 논문에서는 일사량계의 오염 손실이 직달 법선면 조사강도(DNI) 측정용의 직달일사량계(pyrheliometer)의 오염 손실보다 적은 것으로 나타났다 [81]. 다시 말하지만, 이것은 두 센서 유형의 직접적인 비교는 아니다. 직달일사량계는 시야를 제한하기 위해 하나의 쉴드에 의해 어느 정도 보호되기는 하지만 역시 평판형 표면 소자이다.

남아공 CSIR(Council for Scientific and Industrial Research) 캠퍼스에 있는 옥외시험 시설은 조사강도 모니터링을 위해 실리콘 기준 셀과 일사량계를 모두 유지하므로 좀 더 직접적인 비교 평가가 가능하다. 에너지 산출량 테스트 베드는 모듈 및 시스템 연구에 가용한 세 가지 다른 테스트 플랫폼 중 하나이다. 에너지 산출량 테스트 베드는 정기적으로 예정된 I-V 곡선

사이에서 에너지를 회수하기 위해 개별 모듈을 계통 연계된 전자 부하에 연결한다. 테스트 베드에는 어레이면(정북향, 25° 경사각)의 실리콘 기준 셀, 어레이면 일사량계와 알베도를 위한 두 번째 일사량계가 장착되어 있다. 대략 일주일에 한 번 정도 아침에 조사강도 센서를 마른 천으로 청소하여 먼지를 제거한다.

그림 18 은 2019 년 6 월 20 일부터 10 월 4 일까지 건기의 11 주 동안 매주 셀 청소 전후에 일사량계와 실리콘 기준 셀로 측정한 일일 일조량의 차이를 보여준다. y 축은 이 기간 동안 5,500~7,500 Wh/m²/day 범위였던 일일 일조량의 변동성을 제거하기 위해 청소 전날과 청소 당일의 일사량계와 실리콘 기준 셀 간의 일일 일조량 측정치의 차이를 주간 단위로 블록 중심(Block-centred)으로 표시한 것이다. 청소 후 두 센서가 측정한 일일 일조량의 차이 분포는 청소 전날(two-tailed p-값 – 0.01)보다 상당히 적었다. 이러한 차이의 감소는 청소에 기인한 것일 수 있는데, 이는 일사량계(돔)에 비해 기준 셀(평판형)의 오염 손실이 증가한 것으로 설명될 수 있다. 조사강도가 빠르게 변화하는 이른 아침에 청소가 수행되었고 정확한 청소 시간이 기록되지 않았기 때문에 이 데이터 세트는 추가 분석에는 적합하지 않다. 측정된 차이는 42 Wh/m² 이었는데, 이는 일평균 일조량 6,520 Wh/m²/day 의 0.6%에 해당한다. 이 차이에 대한 95% 신뢰 구간은 10~74 Wh/m²/day, 즉 0.2~1.1% 범위였다. 한 주에 0.6%는 이 기간 동안 일사량계(돔 모양)와 비교하여 실리콘 기준 셀(평판형)에서의 추가 오염율에 대한 합리적인 근사치이다.

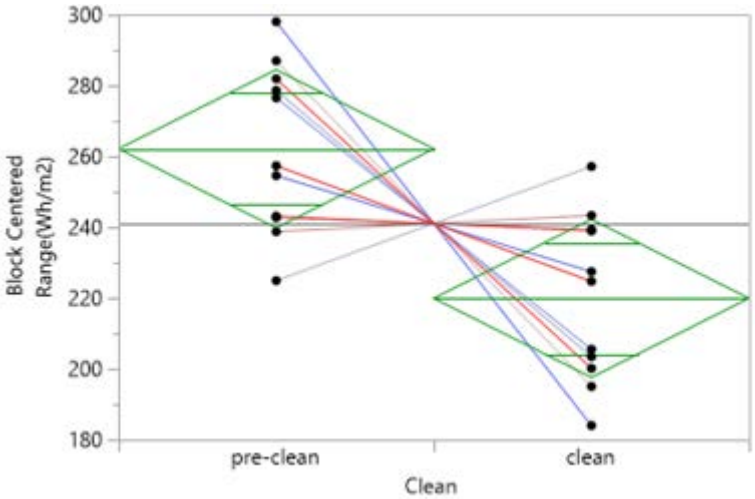


그림 18: 청소 전후에 평판형 기준 셀과 청소 전후 일사량계로 측정한 일일 일조량의 차이를 보여주는 분산 분석(ANOVA).

결론적으로, 일사량계의 오염율은 평판형 기준 셀에 비해 더 낮을 가능성이 높다. 그러나 규격 IEC 61724 에 따라 지면 기반 조사강도 측정에 대한 오염의 영향을 최소화하기 위해 조사강도 센서를 매주 청소해야 한다

4 오염과 눈 모델

4.1 오염 모델

모니터링과 함께 오염이 PV 플랜트의 에너지 산출량과 O&M 비용에 미치는 잠재적인 영향을 사전에 이해하는 것이 중요하다. 이 작업은 설치 및 작동 전에 사이트에서 오염 수준의 직접적인 측정에 의해 이루어질 수 있다. 이 측정을 수행하려면 최소 1 년 동안 오염 센서를 설치해야 한다. 이미 가용한 값이 있는 다른 매개변수로부터 오염 수준이 결정될 수 있다면, 새로운 PV 설치 사이트를 선정하면서 오염의 에너지와 경제적 영향을 평가할 수 있을 것이다. 여러 가지 날씨와 오염물질 인자들이 오염 퇴적과 청소에 영향을 미친다. 또한 고유의 매크로 스케일 인자(예: 토지 사용/토지 피복, 정규화 식생지수(NDVI), 농업 활동, 우세한 오염 유형 등)도 오염 프로파일에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 모든 매개변수 중에서 가장 두드러진 인자(또는 적어도 이 연구 영역에서 가장 반복적인 요인)는 입자 질량 농도 PM10 과 PM2.5, 풍속과 풍향, 돌풍의 빈도, 상대 습도, 비의 강도와 빈도이다 [1]. PM10 과 PM2.5 는 각각 10 µm 이하와 2.5 µm 이하 크기의 부유 입자의 농도(공기 m3 당 질량)를 나타내며 PM2.5 는 PM10 의 부분 집합이다.

부유 입자 물질이 PV 와 CSP(집중식 태양열발전)에 퇴적되는 것을 모델링하기 위한 연구를 기술한 광범위한 문헌 자료가 있다. 2019 년 Web of Science 에서 수행된 서지학적 조사는 그림 19 에서 볼 수 있듯이 연구 분야, 우수 발간물 및 저자와 하위 영역에 대한 전문가적인 개요를 소개하였다. 이 장에서는 특정 오염 데이터나 관심 사이트의 PV 성능 데이터 없이 오염의 퇴적을 예측하기 위한 모델의 개발과 적용을 소개하고 있다.

현재 사용 가능한 일부 모델의 개요는 다음 절에서 보고한다. 모델은 네 가지 범주로 분류된다: 선형 회귀 모델, 반물리적(Semi-Physical) 모델, 인공지능 모델, 지리공간 모델. 4.1.1~4.1.4 절은 각각 다른 범주에 초점을 맞춘다. 기존 모델과 현재 당면 과제의 요약은 4.1.5 절에 소개되어 있다.

그림 19: Web of Science 에 있는 오염 모델 문헌의 서지적 분석[82].

4.1.1 선형회귀 모델

오염 프로파일은 하나 이상의 환경 파라미터의 선형 회귀를 통해 모델링할 수 있다. 모델의 공간 해상도는 풍향과 풍속, 상대습도 및 퇴적 속도와 같은 국부적인 기상 조건을 기반으로 하는 단일 PV 시스템부터 위성으로부터 추출한 입자 물질 밀도와 같은 소규모 해상도까지 다양하다.

가장 간단한 접근법으로, 전기적 혹은 투과율 손실은 전적으로 부유 입자 농도로부터 추정된다. 강우는 일반적으로 오염 손실을 0%(즉, 오염비가 1)로 회복시키는 것으로 가정한다. Boyle 이 제안한 방법은 총 부유 입자(TSP) 농도를 사용하여 옥외 노출 i 일 후 PV 유리의 투과 손실($\Delta\tau$, %로 표현)을 추정한다 [83]:

$$\Delta\tau(i) = 0.005 \cdot \overline{TSP} \cdot i + 0.22 \quad \textbf{(6)}$$

여기서

- $\overline{TSP}$ 는 크기 ≤ 100 μm 입자의 평균 농도
- i = 옥외 노출 일수

가장 일반적인 접근법은 다변량(multi-variate) 회귀 분석이며, 여기서 오염은 많은 변수를 통해 모델링된다. Toth 는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에 의한 오염으로 인한 전기적 손실만을 계산한다 [84]:

$$SR = A_{10-2.5} \cdot C_{10-2.5} + A_{2.5} \cdot C_{2.5} \quad \textbf{(7)}$$

여기서

- $C_{10-2.5}$ 는 가장 최근 강우일로부터 굵은 입자(PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 사이의 차이로부터 계산됨)의 누계
- C_{25} 는 데이터 수집 첫째 날로부터 $PM_{2.5}$ 의 누계
- $A_{10\text{-}2.5}$ 과 $A_{2.5}$ 는 결정되어야 할 일정한 전환 인자(conversion factors). 이들 두 인자는 PM 모니터링에 사용되는 측정기기에 고유한 것이며, 사이트의 배치와 지역 조건에 따라서도 달라질 것으로 예상됨.

반물리적(Semi-Physical) 모델로 분류되는 다른 접근법과 비교하여, 물리적 의미에 대한 조사 없이 데이터의 피팅을 통해 인자들이 결정된다.

다른 경우에는 비입자(non-particulate) 물질 관련 변수를 고려하기 위해 다변량 회귀 분석이 사용된다. 예를 들어, Guo 는 하나의 선형 방정식을 제안하였다 [85]

$$SR = a + b * PM10 + c * WS + d * RH \quad \textbf{(8)}$$

여기서

- PM_{10} : 10 마이크론 이하 입자의 질량
- WS: 풍속
- RH: 상대습도 (%)
- a, b, c, d: 일정한 파라미터들로, 그 값은 데이터 피팅에 의해 결정된다

추후 연구에서, Javed 등은 입력 변수가 10 개인 다중 선형 접근 방식을 테스트하였다 [1]. 2018 년 Figgis 등은 풍속(WS)과 PM_{10} 만을 고려한 퇴적 오염의 질량을 다음과 같이 기술하였다 [48]:

$$Accumulation = 10.6 - 4.99 * WS + 274 * PM10 - 73.4 * WS * PM10 - 14.9\Delta WS1hr \quad \textbf{(9)}$$

여기서

- ΔWS1hr 은 관측 기간의 WS 와 직전 시간의 평균 WS 의 차이였다..

같은 연구에서 저자들은 오염 축적에 영향을 미치는 다양한 현상, 즉 퇴적, 리바운드, 재부유 등을 설명하는 방정식도 보고하였다.

입자의 크기와 조성 또한 오염 손실에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이런 관점에서, Pulipaka 등은 입자 크기에서 유래하는 출력 손실을 추정하기 위해 다중 선형 회귀 분석을 사용하였다 [86].

선형 회귀 분석은 또한 미국의 NREL 팀이 여러 사이트에서 연간 오염 손실의 심각도 순위를 매기는데 사용하였다 [87] [3]. 일일 오염 손실 프로파일을 모사하는 것을 목표로 하는 앞서 언급된 연구와 비교하여, 이 경우에는 오염 손실의 장기 평균을 모델링하였다. 저자들은 시스템의 특성과 지역 환경 조건을 설명하는 100 개 이상의 미시적이고 거시적인 매개변수와 처음에 20 개 나중에 41 개인 오염 관측소의 데이터를 비교하였다. 조사 결과, PM10, PM2.5 및 강우 통계만이 연간 오염 손실과 유의미한 상관관계가 있는 인자들인 것으로 나타났다. 그러나 그들은 또한 데이터 출처와 처리가 이러한 상관관계에 어떻게

영향을 미칠 수 있는지도 보여주었다. 특히 지상에서 측정된 PM 데이터는 위성에서 추출된 농도보다 상관관계가 더 좋은 것으로 나타났으며, 특히 사이트로부터 30~50 km 이내에서 측정된 경우에는 더욱 그러하였다.

유사한 접근법을 사용하여 Cordero 등도 칠레의 6 개 지점에서 측정된 에어로졸 광학 깊이(AOD)와 일일 오염율 사이에 좋은 선형의 상관관계가 있음을 발견하였다 [88]. 이 경우에도 지상에서 측정한 결과가 위성에서 추출한 데이터보다 성능이 뛰어났다.

다른 오염 추정 접근법과 달리 Kimber 등이 제안한 모델은 오염 손실 프로파일을 생성하기 위해 PV 출력 데이터와 강우 정보를 사용한다 [57]. 이 경우 가장 긴 건조 기간의 오염율을 선형 회귀를 통해 결정하고, 그리고 강우가 PV 모듈의 오염을 완전히 제거한다는 가정하에 동일한 비율을 시계열의 모든 건조 기간에 적용한다. 이 방법은 적용하기 전에 최소 청소 임계값(PV 모듈을 청소할 수 있는 최소 강우량)과 유예 기간의 길이(강우가 있은 후 다시 오염이 퇴적되기까지의 일수) 두 가지 값을 결정해야 한다.

4.1.2 반물리적 모델

반물리적(Semi-physical) 모델은 불가피한 것은 아니지만 선형 관계를 모사하려고 한다. 이 모델은 일반적으로 상대습도와 풍속에 국한된 것은 아니지만 이를 포함하는 지역 조건으로부터 입자 퇴적 또는 침강 속도를 결정해야 한다.

Guo 등은 일일 퇴적 및 재부유 비율의 함수로 오염 손실을 계산하는 반물리적 모델을 제안하였다 [85], [53]. 이는 주변 먼지 농도, 퇴적 속도(풍속의 함수), 풍속 및 상대 습도로부터 계산되었다.

전세계 7 개 도시에서 발생하는 오염의 분석에서, You 등은 퇴적된 먼지 농도(w)와 PV 효율 강하 사이에 선형의 상관관계를 가정하였다 [89]. 이 경우, 먼지 농도(w)는 직경 20 μm 와 50 μm ($PM_{50\sim20}$) 이내의 부유 입자의 농도로부터 계산되었다

$$w = ND * PM_{50-20} * Vd * 10^{-6} \quad \textbf{(10)}$$

여기서

- ND = 마지막 강우로부터의 일수
- Vd = 퇴적 속도, 지역의 환경조건을 토대로 결정된다.

Coello 와 Boyle 은 2001 년 Hegazy 가 제안한 방정식을 사용하여 투과율 손실로부터 전기적 오염 손실을 계산한다 [90], [78]. 이 경우 투과율 손실은 누적된 먼지 질량과 동일한 밑수(base)의 거듭제곱 (exponentiation)에 지수 (power) < 1 의 오차 함수로 모델링된다. 특히, 시간 t에 축적된 질량은 다음과 같다:

$$m = (v_{10-2.5} * PM_{10-2.5} + v_{2.5} * PM_{2.5}) * t * \cos(\vartheta) \quad \textbf{(11)}$$

여기서

- $PM_{10\text{-}2.5}$ = 10 μm 과 2.5 μm 사이 굵은 입자의 농도
- ϑ = 경사각
- $v_{10\text{-}2.5}$, $v_{2.5}$ = 퇴적 속도

연구자들은 퇴적 속도의 값을 결정하기 위해 세 가지 다른 접근법을 고려하였다: 퇴적은 한 가지 접근법에서 고려되는 반면 다른 두 가지 접근법에서는 고정 속도가 고려되었다. 고정 속도는 침강 속도와 같거나 인근 관측소에서 관측된 값으로 결정되었다. 최상의 결과는 정적(static) 침강 속도 접근법에서였다.

Bergin 등은 미립자 물질의 고려를 통하여 인도에 있는 PV 시설에서 기록된 일일 투과율 손실을 계산하였다 [91]. 이전과 달리 여기서는 입자 물질의 각 구성요소의 농도와 흡수 및 산란 효율이 고려되었다.

Qasem 등은 다양한 PV 기술에 대한 오염 손실을 계산하기 위해 주변 조건, 시스템 특성, 강우 패턴과 먼지의 분광 투과율을 고려한 보다 복잡한 모델을 제안하였다 [18].

4.1.3 인공 신경망 모델 Artificial Neural Network Models

선형 회귀 및 반물리적 모델과 비교하여 인공 신경망(Artificial Neural Network: ANN) 모델은 오염의 물리적 원리에 대한 이해를 필요로 하지 않는다. 대신, 모델은 입력을 예상 출력으로 변환하는 올바른 알고리즘 (즉, 오염율 프로파일)을 찾기 위해 반복적으로 자체 훈련한다. 개발자의 핵심 과제는 주요 입력과 최고 성능의 아키텍처 (즉, 숨겨져 있는 레이어와 노드의 수)를 식별하는 것이다.

Javed 등은 카타르에 있는 사이트의 오염 손실을 추정하기 위해 ANN 모델을 개발하였다. 네트워크는 하나의 숨겨진 레이어와 20 개의 뉴런으로 구성되어 있는데, 사이트의 환경 조건을 설명하는 10 개의 변수를 입력으로 필요로 한다 [1]. 모형은 측정된 데이터 포인트들과 비교했을 때 R^2 이 0.54 로 나왔다. Laarabi 등은 모로코에 있는 하나의 사이트를 대상으로 다른 ANN 모델을 제안하였다 [92]. 이 경우, ANN 은 6 개의 입력과 35 개의 노드로 이루어진 하나의 숨겨진 레이어를 가지고 있었는데 $R^2 > 0.90$ 의 결과가 나왔다.

하나의 다른 접근법에서, Pulipaka 등은 입자 조성을 기반으로 오염 손실을 예측하기 위해 ANN 모델을 사용하였다 [86]. Shapsough 등은 조사강도와 강우 데이터를 사용하여 오염의 영향을 추정하기 위해 ANN 을 사용하였다 [93].

4.1.4 지리공간 모델

Micheli 등은 공간 보간 (spatial interpolation) 테크닉을 사용하여 인근 위치의 오염 데이터에 기반하여 오염을 추정하는 가능성을 조사하였다 [94]. 역 거리 (inverse-distance) 기반 방법은 오염이 50 km 이내의 사이트에서 추정되는 경우에 $R^2 > 0.7$ 로 최고의 결과가 도출되었다. 사용된 오염 데이터가 조사 대상 사이트와 유사한 특성을 가진 시스템에서만 유래한 것일 경우 결과가 훨씬 더 좋았다. Gosstein 등은 대규모 유틸리티 규모의 PV 시스템 내 오염 손실 분포를 매핑하는데 유사한 테크닉을 사용하였다 [4].

입력 데이터가 광범위하고 체계적으로 사용 가능하다면 이전에 언급된 모델 중 어떤 것이라도 오염 지도를 생성하는 데 사용될 수 있다는 점에 유의해야 한다. 예를 들어, 일일 오염율과 AOD 간의 상관 관계를 기반으로 Cordero 등은 칠레의 오염율 지도를 만들었다 [88]. 하나의 다른 연구에서 Li 등[21]은 다양한 PV 트랙킹 시스템에 대해 회수 에너지 측면에서 오염 완화 혜택 지도를 작성하기 위해 Bergin 모델 [91]을 사용하였다. 저자들은 2003 년과 2014 년의 MERRA-2 재분석 데이터 세트의 입자 질량(PM) 유형과 강우 데이터를 사용하였다. 동일한 접근법은 이전 어떤 모델에 대해서도 반복될 수 있다.

4.1.5 모델의 개요 및 검증과 활용 한계

표 3 은 네 가지 모델 유형을 요약한 것이다. 대부분의 연구는 단일 위치를 기반으로 하는 반면, 여러 위치의 오염은 소수의 연구에서만 조사되었다. 하나 이상의 위치에 대한 오염 측정을 대상으로 하여 서로 다른 접근 방식을 시험한 비교 연구 문헌은 여전히 부족하다. 이는 현시점에서 서로 다른 오염과 환경 조건에서 각 모델의 유효성과 견고성을 평가하기 어렵게 만든다.

Pelland 등에 의한 연구만이 전세계 20 개 지점의 평균 오염 손실 추정에서 두 모델의 성능을 비교하였다 [95]. 모델은 평균 손실이 5% 미만인 사이트에 대해서는 상관 관계가 좋지 않은 것으로 확인되었지만, 오염 손실이 더 높은 사이트에 대해서는 결과가 양호하였다. 또한, 이 연구는 서로 다른 데이터 세트의 입자 물질을 입력으로 제공할 경우 동일한 모델의 결과가 달라질 수 있음을 보여주었다.

Zhou 등은 미국 내 세 곳의 오염 손실을 계산하는데 [96] Bergin 연구진 [91]이 제안한 모델을 사용하였다. 연구자들은 미국 Environmental Protection Energy 의 지역사회 다중스케일 대기질 (Community Multiscale Air Quality: CMAQ) 모델의 입자 물질 데이터를 사용하였다. 그 결과 3 개 사이트에서의 지상 측정과 비교하여 PM2.5 는 과대평가하고 PM10 농도는 과소평가한 것으로 나타났다. 또한, 오염 손실은 현장 측정에 비해 과소평가되었다.

일부 연구에서 연구자들은 동일한 위치를 대상으로 두 가지 모델을 제안하고 비교하였다. 이는 ANN 모델을 사용한 연구에서 특히 흔하다. Pulipaka [86]와 Javed [1] 두 연구팀 모두는 동일한 수의 입력이 제공된 다중 선형 모델보다 ANN 모델로 더 좋은 결과를 얻었다. 반면에 Shapsough 등은 조사강도와 강우로부터 오염 손실을 추정하기 위해 사용한 ANN 모델과 다중 선형 모델의 결과 사이에 유의한 차이를 발견하지 못했다 [93]. 선형 회귀 모형과 반물리적 모형의 비교에서, Guo 등은 결과가 유사하다는 것을 발견하였다 [85].

Pelland 등은 일부 연구에서 서로 다른 소스 또는 다르게 처리된 입력을 사용하여 동일한 모델의 성능을 조사하였다 [95]. 일반적으로, 지상에서 측정된 데이터의 이용이 가능할 때 위성에서 도출된 데이터보다 오염 추정이 더 양호한 결과로 이어졌다. Micheli [3], Cordero [88]와 Coello [90] 연구팀들은 퇴적 속도에 설정된 값이 오염 추정에 어떻게 영향을 미치는가를 보여주었다. 유예 기간과 청소 임계치와 같은 인자들의 값에 대한 합의가 부족하기 때문에 PV 성능 데이터로부터 오염을 추출할 때 다른 결과가 나타날 수 있음을 발견하였다 [57].

이러한 여러 가지 이유로 보편적으로 검증된 오염 모델이 제안되기 전까지는 여전히 추가 연구가 필요하다. 특히 다양한 날씨와 오염 조건에서 서로 다른 접근방식의 장단점을 파악하는 더 많은 비교연구가 필요하다

표 3 은 오염 추정 모델의 개요이다. 모델은 4.1.1~4.1.4 절에 자세히 설명되어 있다. 다음 약어가 사용된다:

- 주위 온도(Ta)
- 풍속(WS)
- 풍향(WD)
- 총 부유 입자(Total Suspended Particles: TSP)
- 상대습도(RH)

표 3: 오염 추정 모델의 개요.

주 저자	모델 분류	연도	목적	핵심 파라미터	주요 결과	참고문헌
Kimber	Linear	2006	PV 성능 데이터로부터 오염 손실을 추출	PV 성능비, 강우	이 모델은 강우 패턴과 가장 긴 건조 기간 동안 기록된 오염비율을 토대로 오염 손실 프로파일을 생성한다. 이를 위해서는 최소 세척 임계값과 건조 기간의 상세 확인이 필요하다.	A. Kimber, L. Mitchell, S. Nogradi, and H. Wenger, 'The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States', in 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Waikoloa, HI, 2006, pp. 2391–2395, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279690.
Qasem	Semi-Physical	2012	기상 데이터를 사용하여 오염 손실 프로파일 모델링	Ta, WS, WD, 먼지, 경사각, 강우	기상조건에 기초한 먼지 축적을 추정하고 PV 모듈 특성 및 먼지의 스펙트럼 투과율을 토대로 이를 전기손실로 변환하기 위해 개발되었다	H. Qasem, T. R. Betts, and R. Gottschalg, Soiling Correction Model for Long Term Energy Prediction in Photovoltaic Modules. New York: IEEE, 2012.
Boyle	Linear	2015	미국 5 개소에서 측정된 일간 오염 프로파일의 모델링	TSP	투과율 손실이 TSP 와 노출 시간의 함수가 되는 선형 모델이 개발되었다.	L. Boyle, 'don't soil your chances with solar energy:experiments of natural dust accumulation on solar modules and the effect on light transmission'. .
Guo	Linear & Semi-Physical	2016	Qatar 에서 오염 측정 시스템의 일간 오염 프로파일의 모델링	WS, PM10, RH	다중 선형 및 반물리적 모델이 개발 및 비교된다. 두 모델 모두 일일 오염 손실 프로파일을 추정하는 데 사용했는데, 불확도 16% 미만의 추정치를 가져다 주는 것으로 나타났다.	Guo B, Javed W, Khan S, Figgis B, Mirza T. Models for Prediction of Soiling-Caused Photovoltaic Power Output Degradation Based on Environmental Variables in Doha, Qatar. ASME 2016 10th Int. Conf. Energy Sustain., 2016, p. 1–8. https://doi.org/10.1115/ES2016-59390.
Pulipaka	ANN & Linear	2016	입자 크기 구성으로부터 오염 손실이 추정된다.	입자 크기	다중 선형 회귀 및 ANN 은 오염의 입자 크기 구성을 기반으로 오염 손실을 추정하는 데 사용된다. ANN 이 더 좋은 것으로 나타났다.	S. Pulipaka, F. Mani, and R. Kumar, 'Modeling of soiled PV module with neural networks and regression using particle size composition', Sol. Energy, vol. 123, pp. 116–126, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.11.012.

Javed	ANN & Linear	2017	Qatar 에서 오염 측정 시스템의 일간 오염 프로파일 모델링	같은 날의 PM10, WS, WD, Ta, RH, 전 날의 PM10, WS, RH, 돌풍 빈도와 노출 시간	하나의 10-input ANN 모델이 오염 손실 추이를 상당히 의미 있게 모델링하여 동일한 입력에 기반한 다중선형 접근 방식보다 더 좋은 결과를 나타내었다. PM10, WS 및 RH 는 오염과 더 연관성이 높은 파라미터인 것으로 확인되었다.	W. Javed, B. Guo, and B. Figgis, 'Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables', Solar Energy, vol. 157, pp. 397–407, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.046.
Bergin	Semi-Physical	2017	인도에서 오염 측정의 프로파일 모델링	PM 구성 농도	오염 프로파일의 모델링은 각 PM10 및 PM2.5 성분의 농도를 토대로 이루어지는데, 각 특정 성분의 흡수와 산란 효율이 고려된다.	Bergin MH, Greenwald R, Xu J, Berta Y, Chameides WL. Influence of aerosol dry deposition on photosynthetically active radiation available to plants: A case study in the Yangtze delta region of China. Geophys Res Lett 2001;28:3605–8. https://doi.org/10.1029/2001GL013461.
Micheli	Linear	2017	미국 20 개 오염 측정소의 평균 오염 손실의 등급 매기기.	PM10, PM2.5, 강우	서로 다른 사이트의 평균 손실을 비교했을 때 PM10, PM2.5 및 강우는 100 개 이상의 잠재 변수 중 최고의 오염 예측 변수인 것으로 밝혀졌다.	Micheli L, Muller M. An investigation of the key parameters for predicting PV soiling losses. Prog Photovoltaics Res Appl 2017;25:291–307. https://doi.org/10.1002/pip.2860.
Figgis	Linear	2018	오염 퇴적과 재부유 모델링	WS, PM10	오염 축적, 퇴적, 재부유 및 리바운드 비율을 추정하는데 다중선형 관계가 제안되었다.	Figgis B, Guo B, Javed W, Ahzi S, Rémond Y. Dominant environmental parameters for dust deposition and resuspension in desert climates. Aerosol Sci Technol 2018;52:788–98. https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1462473.
Cordero	Linear	2018	칠레에서의 오염율 모델링	AOD	AOD 와 오염 비율 사이에 선형 상관 관계가 발견됨. 지상 측정이 위성으로부터 추출된 데이터를 능가하였다.	Cordero RR, Damiani A, Laroze D, MacDonell S, Jorquera J, Sepúlveda E, et al. Effects of soiling on photovoltaic (PV) modules in the Atacama Desert. Sci Rep 2018;8:1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32291-8.
You	Semi-Physical	2018	전세계 7 개 도시의 오염 손실 프로파일 모델링	PM50-20, Vd	오염 축적은 현지 조건에서 계산된 퇴적 속도를 기준으로 계산된다.	You S, Lim YJ, Dai Y, Wang CH. On the temporal modelling of solar photovoltaic soiling: Energy and economic impacts in seven cities. Appl Energy 2018;228:1136–46. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.020.
Zhou	Semi-Physi-	2019	입자 퇴적 추정을 토대로 오염	PM, 강우	오염 손실은 지역사회 Community Multiscale Air Quality (CMAQ)	L. Zhou et al., 'The impact of air pollutant deposition on solar energy system efficiency: An approach to

	cal		손실의 모델링		모델을 사용하여 추정된다. 추정된 PV 패널 투과율은 현장 측정치에 비해 더 낮다.	estimate PV soiling effects with the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model', Sci. Total Environ., vol. 651, pp. 456–465, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.194.
Micheli	Linear	2019	환경 파라미터를 사용하여 미국 41 개 오염 측정소의 평균 오염 손실의 심각성의 등급 매기기.	PM10, PM2.5, 강우	이 연구는 최상의 오염 예측 변수가 PM10 과 PM2.5 이고, 그 다음으로 건조 기간의 평균 및 최대 길이를 설명하는 파라미터임을 확인하고 있다. 그러나 그 결과는 환경 파라미터 출처 및 처리 방법론에 의해 크게 영향을 받을 수 있음을 발견하였다.	Micheli, M. G. Deceglie, and M. Muller, 'Predicting photovoltaic soiling losses using environmental parameters: An update', Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 27, no. 3, pp. 210–219, Mar. 2019, doi: 10.1002/pip.3079.
Shap-sough	Linear & ANN	2019	UAE 한 사이트에 대한 오염 손실 프로파일 모델링	조사강도, 강우, 노출 시간	PV 모듈의 성능을 추정하기 위해 다중선형 및 ANN 모델을 사용하였는데, 그 결과에 큰 차이는 없었다.	S. Shapsough, R. Dhaouadi, and I. Zualkernan, 'Using Linear Regression and Back Propagation Neural Networks to Predict Performance of Soiled PV Modules', Procedia Computer Science, vol. 155, pp. 463–470, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.08.065.
Micheli	Geo-spatial	2019	인근 데이터로부터 평균 오염 손실의 추정	인근 오염 데이터, 사이트의 특징	한 사이트의 평균 오염 손실은 인근 사이트의 오염 데이터를 사용하여 공간 보간법으로 추정할 수 있다.	Micheli L, Deceglie MG, Muller M. Mapping Photovoltaic Soiling Using Spatial Interpolation Techniques. IEEE J Photovoltaics 2019;9:272–7. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2872548.
Laarabi	ANN	2019	모로코의 한 사이트에 대한 오염율 프로파일 모델링	조사강도, Ws, Wd, Ta, RH, 강우	하나의 6-35-1 ANN 모델이 실행, 검증되었다. 민감도 분석에 따르면 상대 습도와 풍향이 첫 번째와 두 번째로 영향력 있는 파라미터로 확인되었다.	Laarabi B, May Tzuc O, Dahlioui D, Bassam A, Flota-Bañuelos M, Barhdadi A. Artificial neural network modeling and sensitivity analysis for soiling effects on photovoltaic panels in Morocco. Superlattices Microstruct 2019;127:139–50. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.12.037.https://doi.org/10.1002/pip.2860.
Toth	Linear	2020	미국 콜로라도 한 사이트에 대한 오염 손실 프로파일 모델링	PM10, PM2.5, 강우	오염 추정 모델을 개발하고 그 결과를 다음 2 가지 측정 기기를 대상으로 비교하였다: 전통적인 PM 모니터와 저가 PM 측정 기기.	Toth S, Hannigan M, Vance M, Deceglie M. Predicting photovoltaic soiling from air quality measurements. IEEE J Photovoltaics 2020:1–6.
Coello	Semi-Physi-cal	2020	미국 9 개 오염 측정소의 오염 손실	PM10, PM2.5, 강우,	오염 손실은 PM 농도와 퇴적 속도를 기준으로 추정된다. 퇴적 속도를 추정하기 위해 사용된	Coello M, Boyle L. Simple Model For Predicting Time Series Soiling of Photovoltaic Panels. IEEE J Photovoltaics 2019;PP:1–6.

			프로파일 모델링	경사각도	다양한 접근법 중에서, 고정된 안착 속도 값과 동일하게 그 값을 설정하면 최상의 결과가 주어진다.	https://doi.org/10.1109/jphotov.2019.2919628.

4.2 눈 모델

눈(snow) 모델링은 두 가지로 나눌 수 있다: 직접 에너지 손실 예측(확률론적 및 커브-피팅 방법)과 적설 예측(임계치 기반 및 제 1 원리(first principle) 방법으로 구성). 직접 에너지 손실 접근법에서 확률론적 방법은 과거 PV 어레이 출력 데이터만 사용하는 반면, 커브-피팅 방법은 어레이 출력과 날씨 데이터 사이의 경험적인 상관관계를 발달시키는 것이다. 대조적으로, PV 패널에서 눈이 흘러내리는 것을 예측하여 에너지 손실을 추정하는 모델은 더 복잡하다. 여기서 임계치 모델은, 초과될 경우 사전에 정해진 속도로 모듈에서 눈이 미끄러지는 한계를 정의한다. 임계치 기반 알고리즘 중 하나인 Marion 모델은 미국 NREL 이 개발한 일반적인 PV 시뮬레이션 소프트웨어에서 구현된다. 제 1 원리 모델은 또한 눈이 흘러내리는 것을 시뮬레이션할 수 있지만 용융과 슬라이딩을 모델링하기 위해 에너지 밸런스 방정식을 사용하게 되면 훨씬 더 복잡하게 된다. 전반적으로 눈으로 인한 에너지 손실을 정량화하는 모델은 최소 11 개가 있다. 일부는 미국에서 종종 여러 사이트에서 검증되었으며, 다른 일부는 비교적 검증되지 않은 상태로 남아 있다. 어떤 모델이 가장 정확한지에 대해서는 합의가 이루어지지 않았으며 다양한 위도, 경사각도와 장착 구성별로 더 많은 검증 작업이 필요하다 [97].

4.2.1 에너지 손실 추정 – 캐나다 사례 연구

PV 시스템에 대해 여러 가지 눈 손실 모델이 사용되었지만, 비교 연구는 거의 수행되지 않았다. 예비 작업으로, 두 개의 눈 흘러내림(snow shedding: 스노우 쉐딩) 모델 - Marion [100]과 Townsend & Powers [101](4.2.3 절 참조) 모델의 성능이 비교되었는데, 190 개의 연합 기상 관측소의 조사강도와 강설량 데이터를 사용하여 캐나다 전역의 에너지 손실 등고선 지도를 작성하기 위해 서로 다른 경사각과 위도에서 시뮬레이션된 PV 어레이를 대상으로 하였다. Marion 모델의 에너지 손실은 Townsend & Powers 모델보다 상당히 높았으며, 동일한 데이터를 사용하더라도 지리적 위치에 따라 상당한 차이를 보여주었다. Marion 모델은 북극권의 고위도에서 피크 손실을 예측한 반면 Townsend & Powers 모델은 퀘벡 북부에서 가장 큰 에너지 손실을 보였다. 두 모델은 Northwest Territories 에서 작동하는 실제 PV 어레이와 비교되었다. 두 모델에 의해 예측된 눈으로 인한 에너지 손실은 현장 데이터에 의한 더 많은 검증의 필요성과 위도/경사각/기술에 따른 고유의 스노우 쉐딩 상수의 결정을 강조하고 있다.

4.2.2 기상 관측소 데이터 선택

주어진 경도와 위도의 캐나다 기후에서 PV 어레이의 눈 손실을 추정하기 위해 태양 일조량과 주변 온도에 대한 기상 관측소 데이터를 새로이 내린 적설 데이터와 결합하였다. 일조량과 외부 온도 데이터는 캐나다 기상 에너지 및 엔지니어링 데이터 세트(CWEEDS)에서 수집되었다 [98]. 눈 시뮬레이션과 관련하여 CWEEDS 관측소가 제공한 매개변수는 시간당

글로벌 수평면, 직달 법선면과 확산 수평면 일조량과 건구 주위 온도이었다. 58°N 남쪽에는 492 개의 기상 관측소가 있으며 1998 년부터 2014 년까지 최소 10 년의 데이터를 보유하고 있다. 58°N 북쪽에는 95 개의 CWEED 관측소가 있는데, 두 개의 태양 조사강도 데이터 세트로 나뉘어져 있다. 1998~2014 년 기간에는 시간별로 구름층 기상 관측소에서 MAC3 모델에 의해 추정된 태양 조사강도를 사용하는 23 개의 사이트가 있었고, 2005~2017 년 기간에는 SUNY/NASA 극지 궤도 위성 추출 데이터를 사용하는 72 개의 사이트가 있었다.

이 연구에서 눈 데이터는 매일 새로이 내린 적설을 자로 측정하는 강수량 관측소의 것으로 1100 개의 사이트가 보유한 1968 년과 2018 년 사이의 데이터를 이용할 수 있었다. 최소 5 년의 중복 데이터가 있고 반경 5 km 내에 적어도 하나의 강수 관측소가 있는지 결정하기 위해 각 CWEEDS 관측소가 조사되었다. 당초 CWEEDS 위치 중 190 개는 근접 조건을 충족하고 인근 강수 관측소와 일치하였다 (그림 20). 이러한 일치된 관측소의 시간별 조사강도와 주변 온도 데이터를 적설 데이터와 결합시켰다.

그림 20: 190 개 지점의 결합 강수량 데이터가 있는 CWEEDS 관측소.

4.2.3 시스템 어드바이저 모델을 사용한 눈 손실 시뮬레이션

눈 손실 시뮬레이션은 Marion 과 Townsend & Powers 의 두 가지 모델을 사용하여 시간 간격으로 수행되었다 [99], [100]. 다른 모델들이 개발되었지만, 이 두 가지는 검증 연구의 대상이기 때문에 선택되었다. Marion 모델은 시스템 어드바이저 모델(System Advisor Model: SAM) 소프트웨어에 통합되어 있다. 이 보고서에서, Townsend & Powers 모델은 Matlab 으로 코딩되었으며, 캘리포니아 Tracke 의 눈 제거 연구에서 제공된 개요를 기반으로 하였다 [100]. 스노우 슬라이딩(snow sliding) 계수를 변경하기 위해 Marion 모델의 별도 버전도 Matlab 으로 코딩되었다.

각 시간 단계에서 Marion 모델은 이전 시간 단계와 비교하여 새로운 강설이 발생했는지 확인한다. 새로운 강설이 발생한 경우 어레이는 완전히 덮여 있는 것으로 간주된다. 눈이 내리지 않은 경우 이전 시간 단계의 어레이 상태가 사용된다. 새로운 강설이 탐지되면 첫 번째 시간을 시작으로 매시간 모델링이 시작된다.

Townsend & Powers 모델은 Marion 모델과 몇 가지 점에서 다르다. 시간별 단계에서 눈의 미끄러짐을 고려하는 대신에 측정된 에너지 손실과 예측된 월별 에너지 손실 간의 상관 관계를 기반으로 월간 에너지 손실 백분율이 계산된다.

Townsend & Powers 모델은 지면에서 어레이 위치까지의 간격, 어레이 아래에 쌓인 눈의 각도와 같은 어레이 고유의 기하학적 측면을 고려한다 [100].

Marion 모델은 주변 온도, 어레이면 조사강도와 눈의 깊이를 필요로 한다. 이러한 데이터 외에도 Townsend & Powers 모델에는 상대 습도가 필요하다. 다양한 장착 구성에서 눈 흘러내림을 고려하는데 있어서 Marion 모델은 눈 미끄러짐 계수를 통해 조정될 수도 있다. Marion 모델은 눈 미끄러짐을 주요 제거 메커니즘으로 간주하고 눈 녹음과 바람에 의한 제거는 고려하지 않는다. 또한 Marion 모델은 데이터 수집 빈도(분, 시간, 일)에 따라 시간 단계를 사용하여 눈 흘러내림을 시뮬레이션하는 반면 Townsend & Powers 모델은 데이터를 월별 평균으로 집계한다. 두 모델 모두 어느 정도 경험적으로 도출된 상수에 의존하기 때문에 위치, 기술과 장착 구성에 따라 달라질 수 있다.

4.2.4 눈으로 인한 에너지 손실: 모델 비교

연간 에너지 산출량의 백분율로서 눈 손실 추정치는 루프탑 및 지상 장착 시스템 모두에 대해 Marion 모델과 Townsend & Powers 모델을 사용하여 45° 와 위도 경사각에 대해 계산되었다. 이러한 모델의 결과는 표 4 에 모든 가용 연도를 기준으로 한 개 국가 전체 평균 눈 손실로 요약되어 있다. Marion 모델의 경우, 눈 미끄러짐 계수는 루프탑 시스템의 경우 1.97, 지상 장착 시스템의 경우 6.0 이었다. Townsend & Powers 모델의 경우에는 지붕 위 0.1 m 간격의 주택용 시스템과 2.0 m 간격의 지상장착 시스템이 비교되었다.

표 4: 모든 사이트에서 눈으로 인한 연평균 에너지 손실 (괄호는 중앙값).

어레이 방향	Marion	Townsend and Powers
경사각 = 45°	Roof: 14.9% (13.7%) Ground: 10.1% (8.5%)	Roof: 4.9% (4.4%) Ground: 2.3% (2.0%)
경사각 = 위도	Roof: 14.8% (13.8%) Ground: 10.5% (8.7%)	Roof: 3.7% (2.3%) Ground: 1.7% (1.2%)

전국 평균에서 볼 수 있듯이 동일한 연간 기상 데이터를 사용하더라도 두 모델 간의 차이는 상당하다. 특정 관측소의 추정치를 전체 국가 수준으로 확장하기 위해 눈 손실 등고선도(contour map) 창출용으로 그리딩(gridding)을 선택하였다. 3D 매핑용으로 지질학에서 사용되는 상용 소프트웨어인 Surfer 17 이 분석에 사용되었다. 자동 그리딩(윤곽(contouring))은 랜덤한 간격의 데이터를 취하고 셀과 노드를 정의하는 중첩된 직교 선을 사용하여 외삽한다. 알고리즘은 모든 노드의 값을 추정하는 데 사용된다. 알고리즘은 또한 실제 데이터와 무관한 노이즈, 비현실적인 특징 및 데이터가 존재하지 않거나 드문 희박한 지역으로 잘못 외삽될 수 있는 값을 도입할 수 있다는 점에 유의해야 한다 [101]. 등고선 지도는 45° 경사각과 위도와 동일한 경사각에 대해 작성되었으며, 눈 흘러내림 모델 각각에 대해 루프탑과 지상 장착 구성 모두를 평가한다. 결과는 그림 21, 22, 23, 24 에 나와 있다. 일반적으로 Marion 모델은 더 따뜻한 지역에서는 거의 0 에서 북극권 내의 몇몇 관측소에서는 최대 42 % 범위의 연간 손실로 더 높은 위도에서 에너지 손실이

증가할 것으로 예측하였다. 지상에 설치된 시스템의 에너지 손실은 루프탑 어레이보다 낮았다. 위도와 45° 경사각 시나리오 사이의 차이는 상대적으로 작았다. 대조적으로 Townsend & Powers 모델은 특히 고 위도에서 손실이 현저히 적다는 것을 보여주었다. 두 모델 사이의 불일치는 향후 추가적인 연구의 주제로 남아 있다.

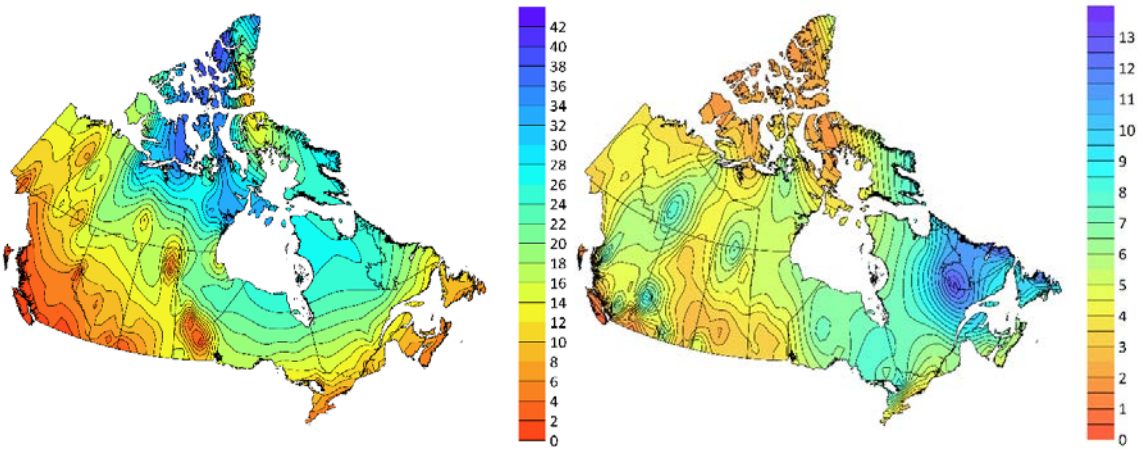


그림 21: 경사각 = 45°, 루프탑 어레이의 연평균 에너지 손실[%]: 왼쪽: Marion, 오른쪽: Townsend & Powers.

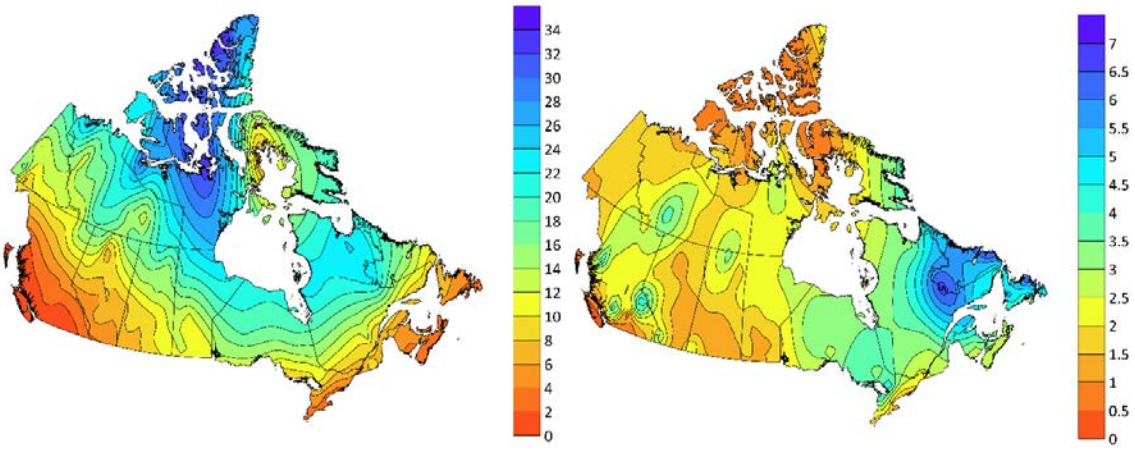


그림 22: 경사각 = 45°, 지상 장착 어레이의 연평균 에너지 손실[%]: 왼쪽: Marion, 오른쪽: Townsend & Powers.

.

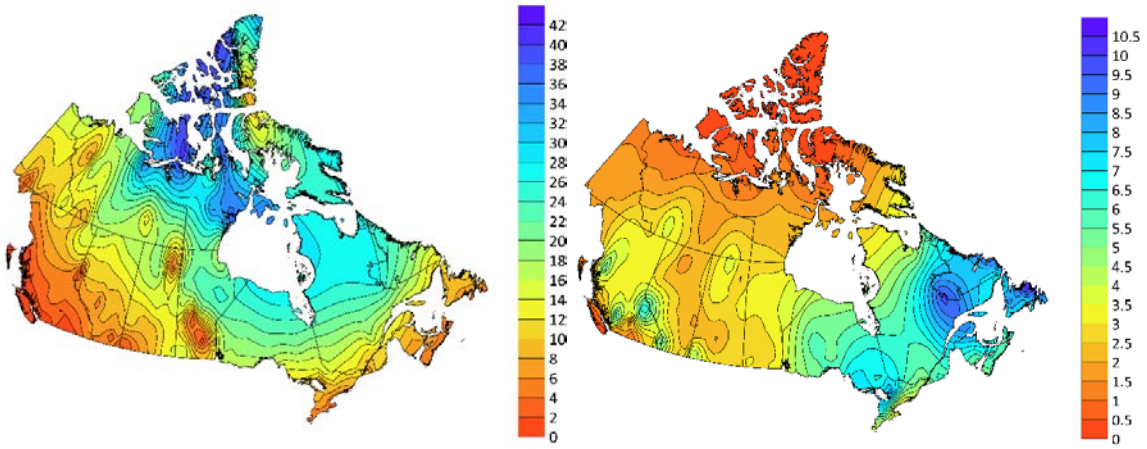


그림 23: 경사각 = 위도, 루프탑 어레이의 연평균 에너지 손실(%): 왼쪽: Marion, 오른쪽: Townsend & Powers.

.

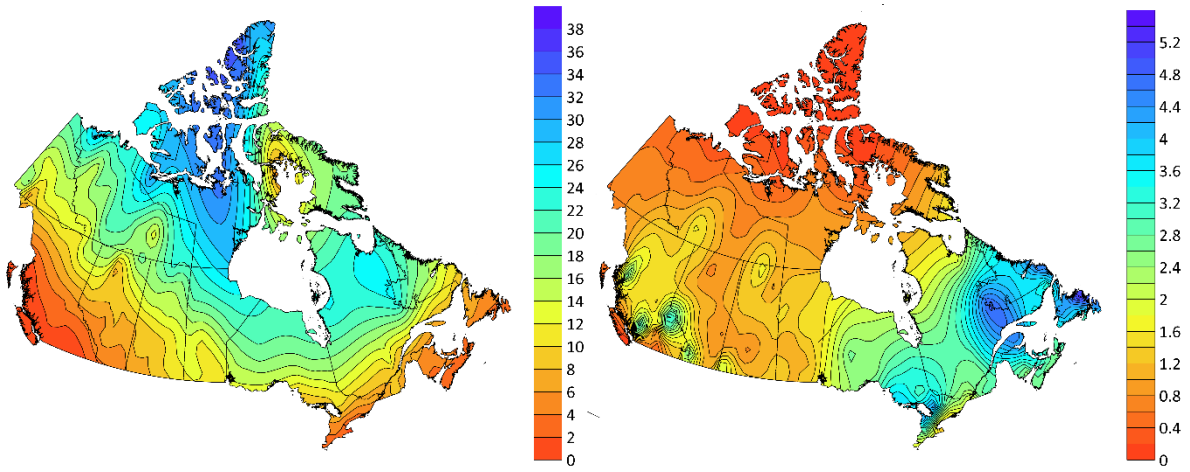


그림 24: 경사각 = 위도, 지상 장착 어레이의 연평균 에너지 손실[%]: 왼쪽: Marion, 오른쪽: Townsend & Powers.

월평균을 사용하면 강수량 데이터 수집이 단순해지지만 시간 단위로 발생할 수 있는 눈 축적과 눈 흘러내림의 복잡한 과정을 가리게 될 수도 있다. 두 모델 간의 불일치는 실제 사이트 데이터를 사용한 더 많은 검증의 필요성을 강조한다. 두 모델에 사용된 피팅 계수는 콜로라도, 위스콘신 및 캘리포니아의 현장 데이터를 사용하여 결정되었다. 이러한 계수는 현장 고유의 지리적 조건, 장착 구성 및 모듈 기술을 반영하도록 확장될 수 있다. 그림 20 과 같이 눈 흘러내림 데이터가 있는 복합 기상 관측소의 분포는 상대적으로 저 위도에 집중되어 있고 북위 60°N 이상에서는 비교적 드물다.

4.2.5 PV 어레이 데이터와의 비교를 통한 모델 검증

모델을 실제 시험사례와 비교하기 위해 Northwest Territories 의 Fort Simpson 에 있는 104 kW 어레이에 대한 눈 손실을 분석하였다. 이 어레이의 경사각은 35°이다. 눈의 영향은 측정된 월간 산출량과 추정된 월간 산출량을 비교하여 정량화되었다 [102] [99]. 월간 예상

산출량은 IEC 61724-1(Ed. 2)에 따른 표준시험조건에서 어레이 일조량, 조사강도 가중 모듈온도, 전력 온도계수와 시스템 성능비의 함수로 결정되었다.

눈 손실 모델을 검증하기 위해 2015 년부터 2018 년까지 Fort Simpson 의 출력 산출량 데이터와 기상 관측소 일조량을 사용하여 눈 손실을 추정하였다. 다음으로 CWEEDS 와 인근 공항의 강수량 기상 관측소 데이터를 결합하여 Marion 모델과 Townsend & Powers 모델이 실행되었다. 3 년의 운영 기간 동안의 전체 눈 손실 백분율은 표 5 에 나와 있다.

표 5: Fort Simpson 에서 눈으로 인한 연평균 에너지 손실(괄호는 중앙값).

어레이 방향	Year	Marion	Townsend and Powers	Empirical
경사각 = 35°	2015	11%	2.2%	8%
지상 장착	2016	17.4%	2.6%	12%
	2017	20.4%	2.5%	15%

이러한 결과는 Marion 모델은 눈 손실을 과대평가 그리고 Townsend & Powers 모델은 과소평가하였음을 보여준다. 평균적으로 Marion 모델은 Townsend & Powers 모델보다 경험적으로 결정된 손실에 더 가까웠다. 불일치의 원인을 이해하고 더 많은 사이트를 사용하여 모델을 검증하기 위해서는 더 많은 작업이 요구된다

5 유틸리티 규모에서 오염에 의한 에너지와 수입 손실의 추정

5.1 오염의 경제적인 영향

오염은 전세계적으로 PV 시스템에 영향을 미치며, 그 영향은 장소, 연중 시기, 사이트와 시스템의 특성에 따라 달라진다. 최근 추정에 의하면, 2018 년 오염은 연간 PV 에너지 생산량의 최소 3%에서 4%의 손실을 초래한 것으로 알려졌다 [6]. 이는 30 억~50 억 €의 경제적 손실에 해당한다 (그림 25). 이러한 손실은 여러 요인으로 인해 2023 년까지 최대 4%에서 5%로, 40 억에서 70 억 €로 증가할 것으로 예상된다. 첫째, 일반적으로 오염에 더 많이 노출되는 중국이나 인도와 같은 지역에 더 많은 PV 모듈이 설치되고 있는데, 이 지역은 일조량이 더 높다. 둘째, 전기 가격 인하는 회수된 kWh 에 대한 수입을 낮추기 때문에 청소를 "적용하기 덜 간편하게" 만들 것이다. 끝으로, 동일한 정도의 오염 하에서는 효율이 더 높은 모듈이 효율이 상대적으로 낮은 모듈에 비해 더 큰 에너지 손실을 입게 된다.

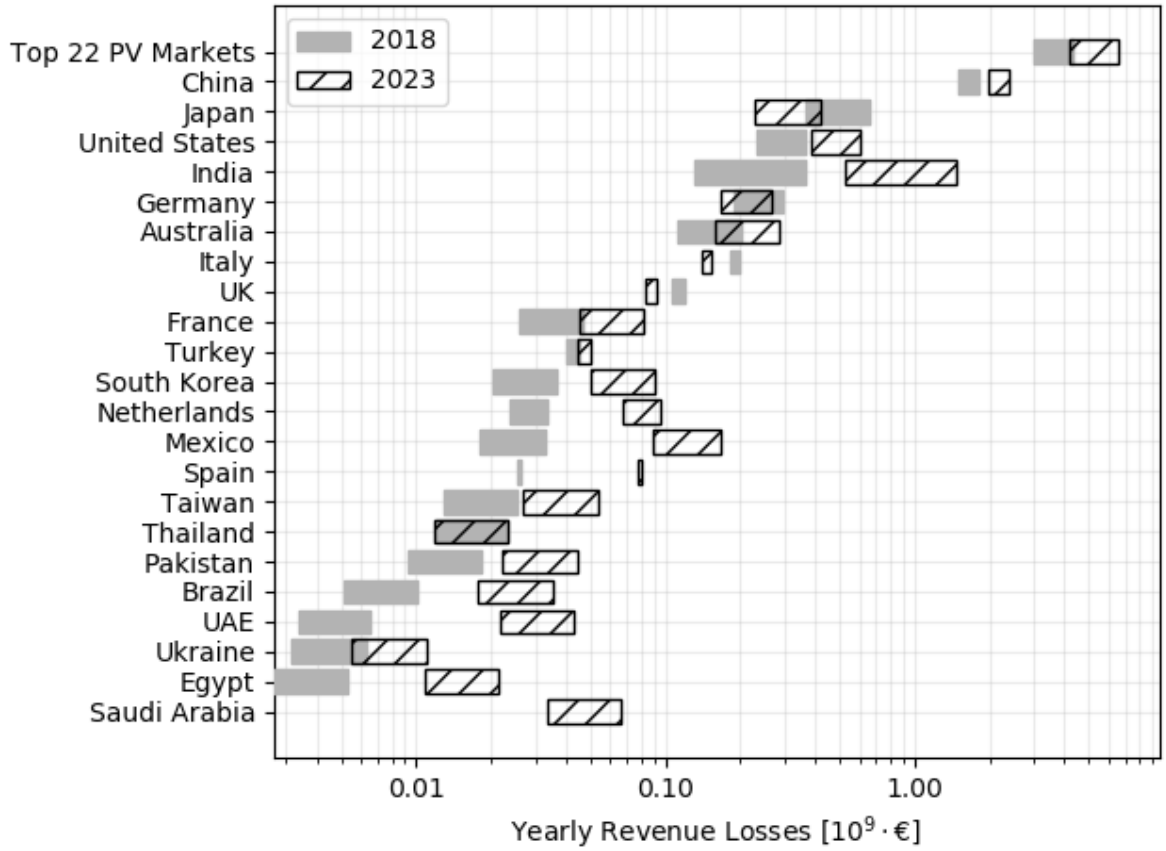


그림 251: 글로벌 경제적 손실: 2018 년과 2023 년 상위 22 개 PV 시장의 국가별 경제적 손실. 문헌 [6]의 데이터와 방법론.

앞서 언급한 작업은 최적의 청소 일정 시나리오를 고려하는데, 여기서 모든 PV 시스템은 수입 손실과 청소 비용의 조합을 통해 오염의 재정적 손실을 최소화하도록 운영된다. 실제 환경에서는 많은 시스템이 최적의 청소 일정으로 운영되지 않기 때문에 손실이 더 클 것으로 예상된다. 예를 들어, 루프탑 시스템의 점유율 증가는 오염의 글로벌 영향을 더욱 높이는 데 기여할 수 있다.

PV 모듈을 청소하는 데는 인건비와 재료비를 결합한 비용이 든다. 이는 일반적으로 PV 모듈 m^2 당 청소하는 데 필요한 비용을 나타내기 때문에 단위 면적당 통화로 표시된다 (그림 26). 가용성과 자원(예: 물) 비용, 인건비 및 현장 접근성과 같은 요인이 청소 비용에 영향을 미칠 수 있다. 하나의 PV 사이트 전체를(U) 청소하는 비용은 시스템 크기(C)와 PV 모듈 유형에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$U = u \cdot A_{tot} = \frac{u * C}{P_{mod}/A_{mod}} \tag{12}$$

여기서

- u 는 1 회 청소 비용 (€/m^2)
- P_{mod} = 정격 출력
- A_{mod} = 각 PV 모듈의 표면적.

이 방정식은 동일한 출력 용량의 조건 하에서는 모듈의 효율이 증가하면 비용 U 는 낮아지는데, 효율이 더 높은 모듈은 청소면적이 더 적다는 것을 보여준다.

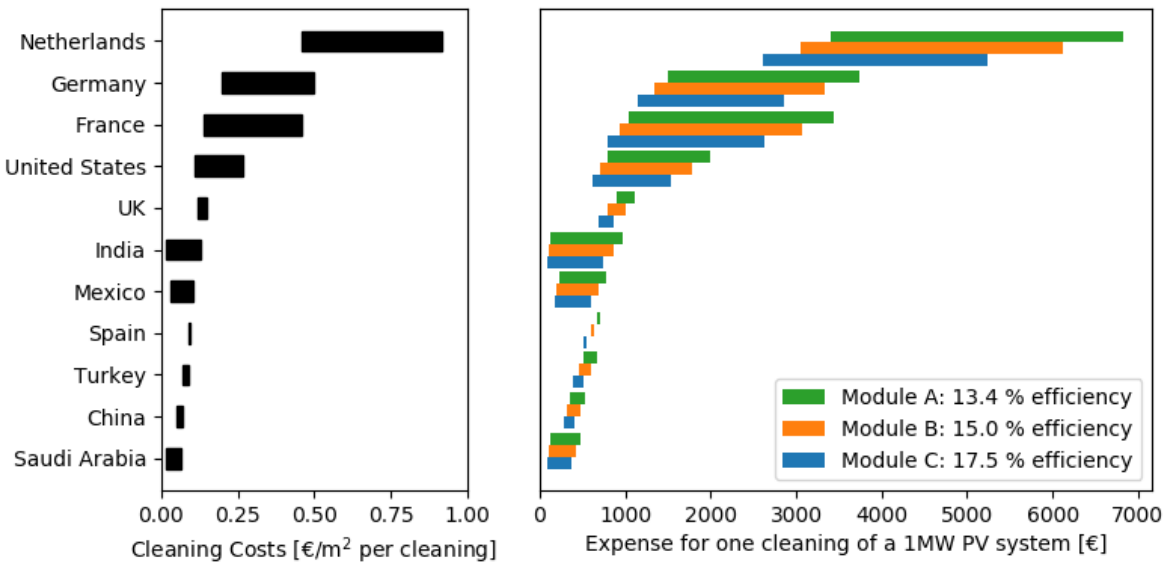


그림 26: 청소 비용과 경비. (좌): 대표적인 시장에서 PV 청소 비용(Ilse 등의 문헌). (우): PV 모듈의 효율에 따른 하나의 1 MW 시스템 청소 경비.

표면에 오염이 없거나 매우 제한적인 PV 모듈을 청소하는 것은 불필요한 경비인데, 왜냐하면 청소 비용의 지출로 인한 에너지 획득은 전혀 없거나 매우 제한적이기 때문이다. 반면에, 오염된 PV 모듈을 청소하지 않는 것은 또한 돈을 잃어 버리는 것이다. 이런 이유로

PV 시스템은 전기적 성능을 최대화하고 동시에 비용을 최소화하기 위해 가능한 최적의 청소 일정에 가깝게 운영되어야 한다. Mani 와 Pilai 는 PV 사이트의 위치, 기후대 및 기상 조건을 기반으로 청소 루틴의 권장사항 목록을 작성하였다 [103]. 이는 유용한 지침이지만 청소 일정은 여러 요인에 따라 달라지므로 각 PV 사이트별로 구체적으로 재정립되어야 한다 [104]. 청소 비용과 PV 모듈 효율 외에도 청소 일정의 수익성은 다음과 같은 요인에 의해서도 좌우된다:

- 오염 퇴적율,
- 시스템의 용량 인자,
- 회수된 에너지의 가격(kWh 당 통화).

가장 편리한 청소 일정을 확인하기 위해 다양한 경제적 모델이 제안되었다. 가장 간단한 방법은 에너지 생산 손실에 의한 수입의 손실보다 청소 비용이 낮을 때마다 청소를 수행하는 것이다. 오염으로 인해 생산되지 못한 에너지의 수입 손실을 정량화하기 위해 생산 손실 비용(Cost of the Production Losses: CPL)이라는 메트릭스가 제안되었다 [105]. 오염으로 인해 손실된 에너지에 전기 판매가격을 곱해 구한다:

$$\begin{aligned} C_{PL} &= (P_{STC_clean} \cdot \eta_{ineff} \cdot T_M) \cdot (R_S + R_{inc}) C_{PL} \\ &= (P_{STC_clean} \cdot \eta_{ineff} \cdot T_M) \cdot (R_S + R_{inc}) \end{aligned} \quad \textbf{(13)}$$

여기서

- P_{STC_clean} 은 청결 모듈에 의해 생산되는 표준시험조건 출력
- η_{ineff} 는 오염으로 인한 효율 손실
- TM 은 청소 작업을 수행할 가치가 있는 계기
- R_S 와 R_{inc} = 생산된 각 kWh 에 대한 절약가치와 인센티브 가치 (€).

이 접근법을 사용하여 CPL > U 일 때 청소를 수행해야 한다. CPL 방정식은 태양광 홈시스템에도 적용할 수 있도록 수정되었다 [106].

이 간단한 방법은 오염에 의한 수입 손실과 청소 비용을 일치시키는 데 효과가 있다. 또한 이상적인 청소 일정은 강우, 바람 및 이슬과 같은 천연의 작용제가 무료로 PV 모듈에 청소 효과를 줄 수 있다는 사실도 고려해야 한다 [57], [107], [23]. 이러한 이유로, 그림 27 과 같이 청소 일정을 좀 더 최적화할 수 있는 여지가 있다. 표시된 예제에서 최적의 청소일은 CPL > U 조건이 충족되는 날에 비해 오염 비용을 17%나 줄일 수 있다. 그림의 데이터는 3 개월 반의 건조 기간 동안 캘리포니아 사이트에서 취한 오염 측정값으로부터 모델링한 것인데, 여기서는 가상적인 하나의 1 MW 시스템을 대상으로 효율 17.5%의 모듈, 일일 고정 용량 인자 20%, 청소 비용 0.2 €/m^2 과 전기 가격 0.09 €/kWh 의 세부 내역으로 구성되어 있다.

이러한 최적화 기회 때문에, 오염으로 인한 경제적 손실을 더욱 줄이기 위해 문헌 상에서 추가 모델이 제안되었다. Jones 등은 청소 비용과 수입 손실의 합으로 오염의 총 비용을 최소화하는 방법을 제안하였다 [56]. Ilse 등은 오염 관련 총비용의 최소화를 겨냥한 유사한 접근법을 사용하였다 [6]. 사우디아라비아의 PV 시스템 데이터 분석을 통해 Herrmann 은 하루당 평균 오염율과 청소 비용이라는 두 가지 매개변수를 기반으로 연간 최적 청소 횟수를 확인하는 모델을 개발하였다 [108]. Besson 등은 수입과 청소 비용의 차이를 극대화하는 방법을 제안하였다 [59].

$$max\ \Sigma_{t=1}^{T} ss_t \cdot CP_t \cdot EP - x_t \cdot U \quad \textbf{(14)}$$

여기서

- ss_t= t 일차 오염 손실
- CP_t = t 일차 청결 조건에서의 에너지 산출량
- EP 는 전기 가격
- U 는 1 회 청소의 총비용
- x_t 는 t 일차의 플랜트의 결정 이진 변수(binary variable)이다.

이러한 접근법에서는 강우의 청소 효과도 고려된다. You 등은 PV 시스템의 순 현재가치(Net Present Value: NPV))의 최소화를 위한 최적화 방법을 제안하였다 [89]. 이러한 모든 최적화 모델은 오염의 경제적 비용을 최소화할 수 있지만, 현장 PV 시스템에 대한 O&M 결정을 내리는 데 쉽게 적용할 수 있는 첫 번째 간단한 방법에 비교하여 오염과 강수량의 연간 변동성을 고려할 때 실제 시나리오에서는 사용하기가 더 어렵다 [87], [109].

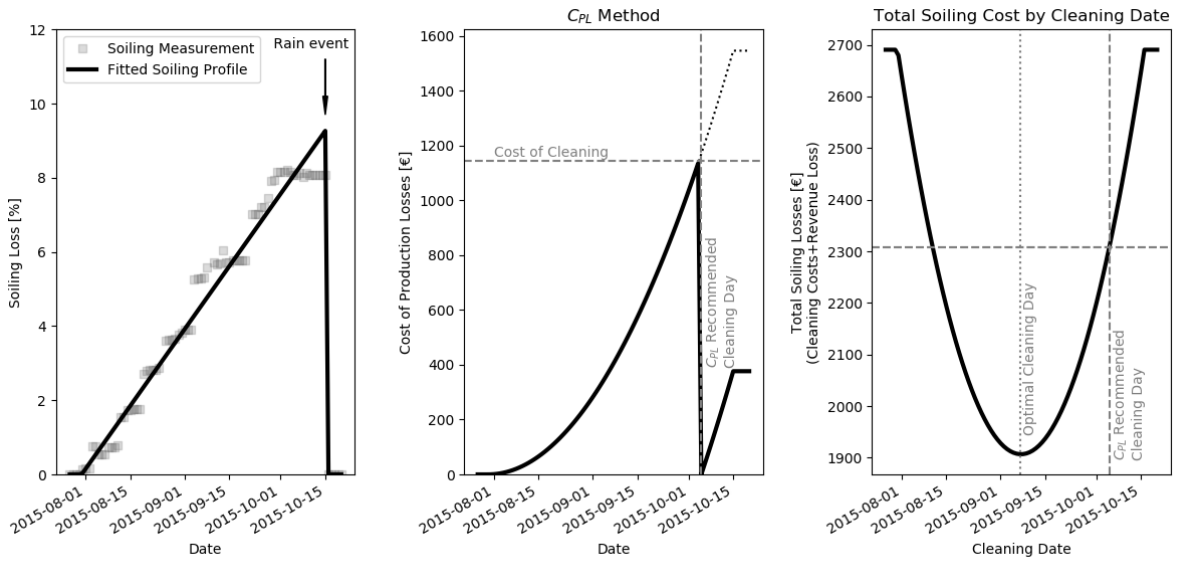


그림 27: 모델 비교. (좌): 캘리포니아의 한 사이트에 기록된 하나의 건조 기간 동안의 오염 손실 [87]. (중): CPL 방법을 사용하여 가장 편리한 청소일을 확인하기 위해 생산 손실 비용과 청소 비용을 비교 [105], [110]. (우): 한 번의 청소 시나리오에서 서로 다른 청소일에 대한 총 오염 손실 비교. 고려 조건: 모듈 효율 17.5%, 고정 용량 인자 20%, 청소 비용 0.2 €/m², 전기 가격 0.09 €/kWh 의 1 MW 플랜트.

5.2 전세계 오염 손실: 자원과 가변성

PV 오염 손실과 관련한 주제에 대해 많은 출판물이 소개되었다. 그러나 이들 중 다수는 독립적인 사례 연구이며, 오염 정보는 체계적인 방식으로는 자주 보고되지는 않는다. 오염을 정량화하기 위해 다양한 메트릭스가 실제로 사용되며, 경우에 따라 동일한 메트릭스라도 그 정의가 약간씩 다르다. 예를 들어 연간 오염율이 일간 값의 단순 평균과 일간 값의 조사강도 가중 평균 둘 다로 보고되고 있다.

이 모든 정보를 수집하기 위한 노력의 일환으로, 일부 데이터 출처를 다른 위치의 오염 데이터를 보여주기 위해 사용할 수 있다. 여러 검토 논문들이 문헌 [12], [11], [111], [6]에 발표된 데이터를 수집하였다. 첫 번째 오염지도(soiling map)[2]는 NCPRE(인도)에 의해 출판되었으며 전 세계 많은 지역에서 수집된 오염율 [%/일]을 보고한다. 이 값들은 문헌에서 나온 것이기 때문에 각각 독특한 방식으로 계산된다. 한편, NREL 오염지도 [3]는 미국에 위치한 PV 시스템과 오염 관측소에서 측정된 83 개의 오염 데이터를 보여준다. 이 경우, 오염은 체계적인 접근법을 사용하여 정량화되지만, 오염 측정소와 PV 시스템의 경우가 서로 다르다 [3]. 사용 가능한 오염 데이터가 없는 사이트의 오염을 추정하는 데 사용할 수 있기 때문에 이러한 출처의 자료는 가치가 있다. 실제로, 인근에 있는 하나 이상의 위치에 대한 오염 데이터가 주어지면 공간 내간 기법을 통해 한 사이트의 오염 손실을 추정할 수 있다 [94]. 유사한 특성(예: 트랙킹 유형 또는 장착 유형)을 가진 사이트를 비교할 경우 추정의 불확도가 감소하는 것으로 나타났다.

이전에 나열된 출처의 자료 중 어떤 것도 현재 오염의 시간적, 공간적 변동성을 고려하지 않는다. 실제로, 인근 시스템들은 서로 다르게 오염될 수 있으며 심지어 같은 장소 내의 오염도 크게 변할 수 있다. 이는 기후 조건에서 시스템 특성과 PV 모듈 설계에 이르는 여러 인자들의 결과일 수 있다 [23]. Gostein 등은 동일한 사이트 내의 손실이 2 배까지 달라질 수 있음을 보여주었다 [51]. 캘리포니아의 두 곳을 대상으로 실시된 더 최근의 연구에서는 심지어 오염율이 2 배 또는 3 배나 달라질 수 있다는 것이 발견되었다. 불균일성은 오염 "방출제(emitters)"의 공간 분포와 우세한 바람 방향에 따라 달라질 수 있다.

5.3 사례 연구: 온대기후에서의 장기적인 오염 손실

오염은 일반적으로 건조(arid) 또는 사막 지역에서만 문제가 되는 것으로 추정된다. 또한, 비가 오는 곳의 PV 시스템은 잦은 강수량에 의해 지속적으로 씻겨지는 것으로 쉽게 간주될 수 있다. 대신, 다음의 예는 일반적으로 오염이 없는 것으로 간주되는 스위스와 같은 곳에서도 어떻게 오염이 천천히 축적될 수 있는지 보여준다.

스위스 베른 응용과학대학교(Bern University of Applied Science: BFH) Burgdorf 의 PV- Laboratory 는 1994 년부터 60 kWp 용량의 PV 시스템 테스트 센터를 운영하고 있다. 이 시스템은 1993 년 여름에 장착된 1,056 개의 프레임이 있는 모듈(Siemens M55HO)로 구성되어 있으며, 경사각은 30°이고 긴 쪽이 수평 위치에 있다. 이 시스템은 발전기는 "Tiergarten West" 와 "Tiergarten Ost" 라고 불리는 30 kWp 두 부분으로 나뉘어져 있다.

태양광시스템은 BFH Burgdorf 의 전기공학과 건물 꼭대기에 있으며, 약 15,000 명의 주민이 거주하는 마을 내에 지상 약 10 m 높이에 있다. 이 마을을 둘러싼 지역에는 경공업과 특히 봄에 생물학적 오염(꽃가루)을 일으키는 숲과 농장이 있다. 특이한 오염의 가장 중요한 외부 요인으로 PV 시스템에서 100 m 미만의 거리에 있는 철도 라인(Bern-Zürich)이 있다. 많은 열차가 정차하는 Burgdorf 역이 1 ㎞도 채 안 돼 건물을 지날 때 많은 열차가 제동을 하거나 가속을 하고 있다. 이 지역은 상당히 습하고 자연 강우량은 1 년에 m^2 당 1,000 리터 이상으로 일년 내내 충분히 분포되어 있다. 이러한 조건들은 플랜트 설치하기 전에 자연 청소가 충분할 것이라고 간주하게 만들었다.

[2] http://www.ncpre.iitb.ac.in/ncpre/pages/SERIIUS_Soiling_rate_of_the_World.html
[3] https://www.nrel.gov/pv/soiling.html

1994 년부터 1996 년까지는 봄에만 명확하게 보이는 오염이 관찰되었지만, 1997 년에는 7 월 말부터 11 월 초까지 다소 건조하고 화창한 기간과 함께 모듈 프레임 하단 가장자리에 항구적인 오염 스트립(1 cm 에 이르는 치밀한 오염에 이어 치밀하지는 않지만 눈으로 보이는 스트립이 수반)이 발견되었다 이 오염 스트립이 어레이 성능에 미치는 영향은 셀과 프레임 사이의 거리(1~2 mm)가 매우 짧기 때문에 시스템 메인 파트의 PV 모듈(긴 쪽이 수평 위치에)에서 특히 심각한 것으로 밝혀졌다. 1998 년 봄까지 10%에 달하는 손실이 발생하였다 [112]. 그 때까지 청소는 PV 모듈이 아닌 조사강도 센서에 대해서만 이루어졌다.

오염의 영향이 크기 때문에 정기적인 청소 일정을 수립하여 1998 년, 2002 년, 2006 년, 2010 년, 2012 년, 2016 년, 2020 년 여름에 청소를 실시하였다.

"Tiergarten West"의 30 kWp 스트링의 I-V 측정은 각 청소 전후 며칠 동안 수행되었다. 기상 조건과 실제 오염에 따라 청소로 인한 평균 "이득"은 몇 %에서 최대 10%까지이다 (표 6).

표 6: 2002 년부터 2020 년까지 스트링 I-V 측정으로부터 성능 이득의 백분율 계산.

연도	1998	2002	2006	2010	2012	2016	2020
증가 %	10.0%	9.3%	3.2%	9.9%	2.3%	9.9%	5.4%

시설의 성능에 미치는 장기적인 영향을 조사하기 위해 오염을 포함한 서로 다른 운영상의 손실의 척도가 되는 모니터링 데이터로부터 시스템 보정 인자 k_G 가 계산되었다.

그림 28 은 오염으로 인한 측정 손실의 정성적인 전개와 청소 후 각각의 이득을 보여준다. k_G 값은 4 월부터 9 월까지 1 년 동안 평균화되었으며, 적설 기간은 제외되었다. 청소의 경우 이 계절은 청소하기 전과 후의 달로 나뉜다. 2020 년 8 월 말에 청소가 이루어졌다. Period 8 의 k_G 데이터 포인트는 2020 년 9 월에 측정된 포인트로만 구성된다.

2010 년까지 청소 효과로 인해 k_G 가 확실히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 2012 년부터는 더 이상 지속적인 성능 향상을 찾을 수 없다. 모듈들은 정상적인 평형 오염 수준으로 다시 빠르게 돌아가는 것처럼 보인다. 시간이 지남에 따라 모듈의 노후화 또는 부적절한 청소로 인해 모듈의 유리 표면이 변화되었을 수 있다.

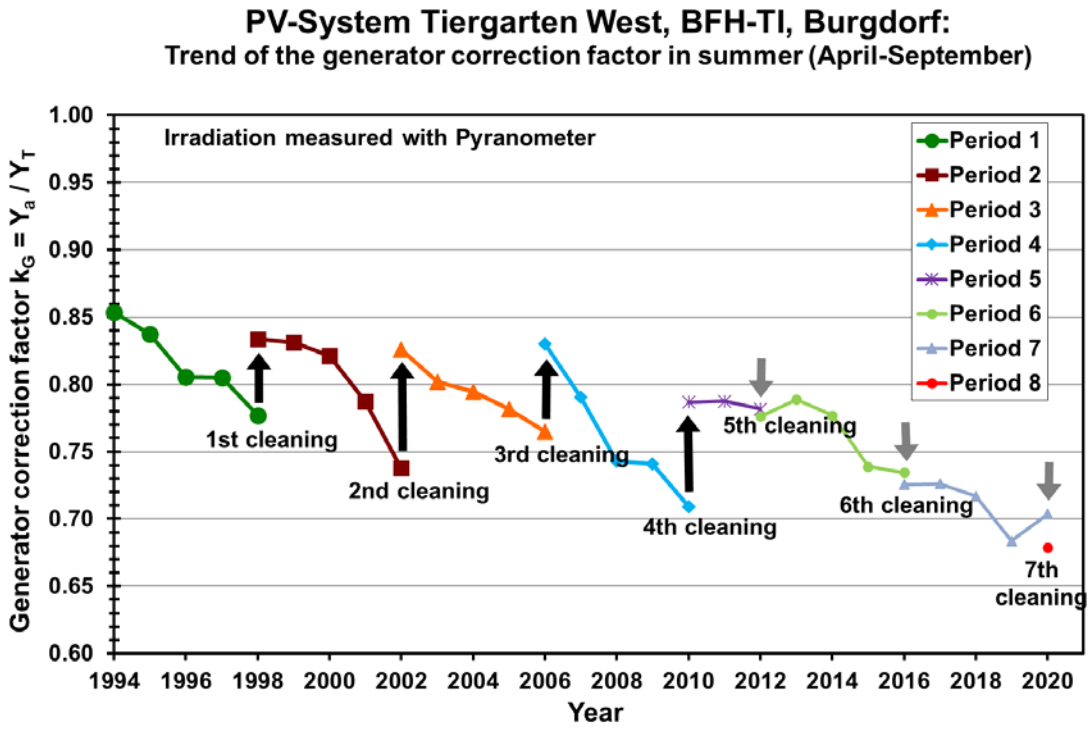


그림 28: 1994 년부터 2020 년까지 30 kWp " Tiergarten West " 의 성능비.

기술한 바와 같이, 심지어 빈번히 자연적인 청소 이벤트가 발생하는 장소에서도 오염은 수년 동안 천천히 축적될 수 있다. 이러한 이유로 PV 시스템에 대해 매년 혹은 적어도 주기적으로 수동 청소를 수행하여 자연 이벤트에서 씻겨나가지 않는 오염을 제거하고 오염과 모듈 표면 사이에 단단한 결합이 생성되지 않도록 해야 한다 [91].

6 PV 시스템에서 오염 손실의 완화

일반적으로 오염 완화 방법은 예방적 조치와 시정적 조치로 분류할 수 있다. 사이트와 모듈 선택, 오염방지 코팅 적용, 사이트 적응 등의 측면에서 예방적 조치는 엔지니어링, 조달 및 건설(EPC)의 책임에 속하는 반면, 올바른 청소 기술을 선택하는 등의 시정적 조치는 O&M 의 권한에 속한다. AlDowsari [113]와 Ilse [6] 등은 손실과 완화 전략에 대한 기술 경제적 평가와 함께 완화 전략을 요약하였다.

청소는 수동 청소, 반자동 청소 및 완전 자동 청소로 세분할 수 있는데, 각각의 물 소비량이 다르다. 미시적 기후의 비용, 잠재적 손상과 영향은 상당히 다양하다. 오염은 지역 조건에 따라 크게 달라지기 때문에 "모든 경우에 적용될 수 있는" 접근법이 없다는 데 의견이 일치한다.

오염방지 코팅((Anti-Soiling Coating: ASC)은 입자의 퇴적을 방해하는데, 이는 입자 점착물리학, 입자를 멀리 떨어지게 만드는 정전기력을 사용하는 전기역학적 쉴드로 기술될 수 있다. Ilse 등은 이슬 완화를 시행토록 제안하고 있는데 [6], 이슬은 쉽게 제거될 수 없는 딱딱한 층으로 이어질 수도 있는 교결과 케이킹 프로세스에서 주요 인자이기 대문이다. 끝으로, 현장 적응, 새로운 모듈과 플랜트 설계(예: 동-서를 향한 수직 양면형 모듈) 및 트랙킹 솔루션(예: 야간에는 치우기)은 오염을 더욱 완화할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

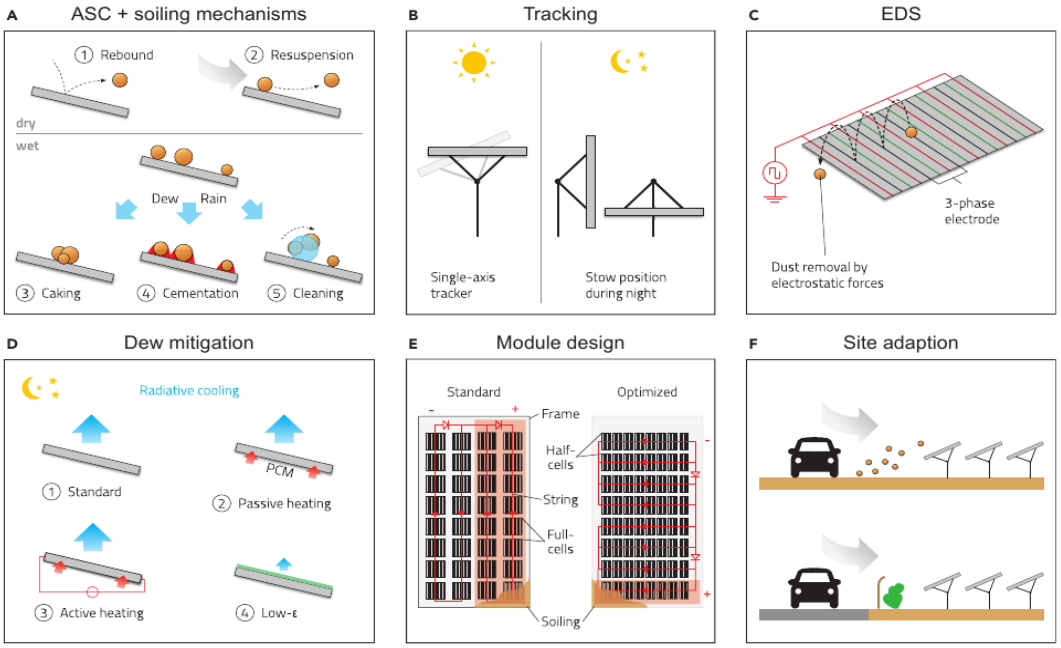


Figure 4. Schematic Illustration of Soiling Mitigation Technologies
(A) Important soiling mechanisms which could be addressed by anti-soiling coatings (ASCs).
(B) Single-axis tracking and optimization of night stowing position.
(C) Working principle of EDS (standing wave version).
(D) Dew mitigation by low-ε coatings and active and passive heating.
(E) PV module design approaches for soiling loss reduction: the red overlay indicates lost cell strings dew to soiling.
(F) Site adaption.

그림 29: 청소 외의 오염 완화 접근법[6].

6.1 예방적 완화 방법

6.1.1 사이트의 평가, 적응과 계획

설계와 시공 단계의 시작부터 오염 고려사항은 시스템 설계의 필수적인 부분이 되어야 한다. 주 풍향, 강우 빈도, 상대 습도 및 이슬 발생과 같은 지역 기상 조건에 대한 지식은 오염을 최소화할 수 있는 시스템으로 만드는데 도움이 될 것이다. 예를 들면, 먼지 돌풍을 피하기 위해 인근의 더러운 도로를 따라 수목을 심을 수 있다. 프레임이 없는 모듈은 오염 제거를 더 쉽게 할 수 있으며, 바이패스 다이오드가 있는 최적화된 모듈 설계는 불균질한 오염에 의한 부분 음영의 영향을 최소화할 수 있다. 6.2.3 절의 사례에서 설명한 바와 같이 단일 및 양축 트랙커도 유용할 수 있다.

6.1.2 오염방지 코팅

친수성/소수성 코팅

청소가 용이하며 자체 청소 또는 오염 방지로도 알려진 수동적 예방 방법은 소수성, 친수성 또는 광촉매로 분류될 수 있는 코팅을 기반으로 한다.

청소가 용이한 표면을 갖는 소수성 코팅은 표면 에너지가 낮아 접촉각(contact angle)이 높은 발수성 표면 특성을 나타내면서 물방울 형성으로 이어진다. 이 물방울들은 표면에서 굴러 떨어져 먼지 입자들을 모은다. 특정 미세 구조를 적용함으로써 접촉각이 150° 이상인 초소수성 표면으로 조정할 수 있는데, 이를 흔히 연꽃 효과라고 하며, 셀프 클리닝 기능을 유도하게 된다. 이러한 코팅은 대부분 불소폴리머 또는 소수성 기능화 실리카를 기초로 한 것이다.

반면, 셀프 클리닝 표면을 갖는 친수성 코팅은 높은 표면 에너지로 인해 물을 끌어들인다. 따라서 이들은 접촉각이 낮아 물이 표면을 가로질러 퍼지게 한다. 접촉각이 10° 미만이 되면(초친수성), 경사각과 물의 양이 충분하다는 가정하에서 완전한 습윤(wetting)이 보장된다. 코팅 물질은 이산화규소 또는 이산화티타늄을 기반으로 한다. 후자의 재료에 기초한 코팅은 UV 조사 하에서 유기 오염물의 분해를 방지하고 완화를 개선하는 광촉매로서의 기능과 빗물로 표면의 오염물 청소를 용이하게 하는 초친수성의 기능을 모두 제공한다 [114], [87]. 일반적으로 친수성 코팅은 스퍼터링 또는 습식 화학 공정(예: 롤러 코팅)으로 증착한다.

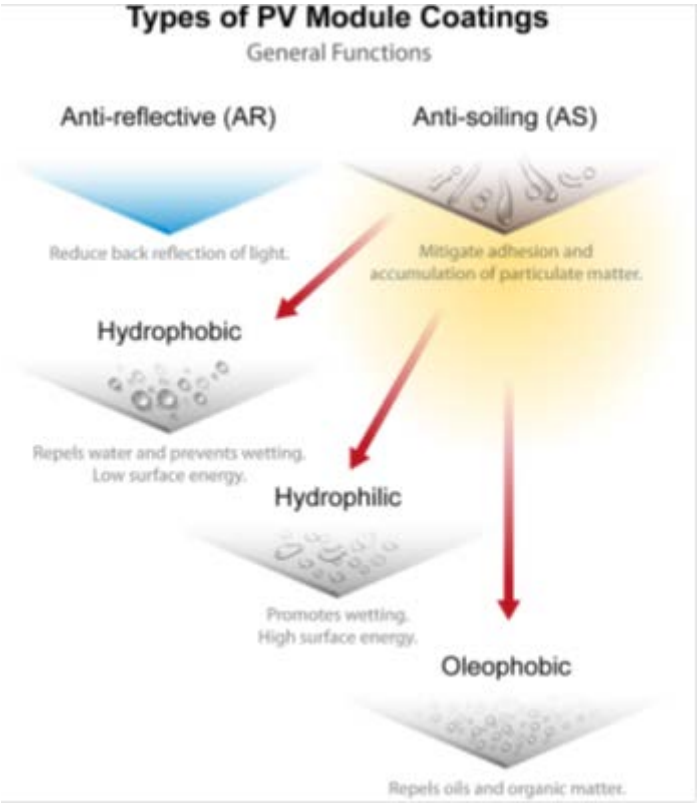


그림 30: 다양한 유형의 오염 방지(AS) 코팅 [115].

친수성 또는 소수성 오염방지 코팅이 효과적인지에 대해서 동의는 없다 [116]. 예를 들어, 소수성 코팅이 PV 를 청소하기 쉽게 만들더라도, 반드시 오염방지 특성의 결과로 이어지지는 않을 것이다 [117]. 특정 상황에서는 코팅된 유리가 코팅 없는 유리에 비해 실제로 오염을 증가시킬 수 있다. 따라서 오염방지 코팅의 편익은 현실적인 기후 조건, 청소 주기, 제조 비용 및 기타 인자들을 고려하여 각 기술 경제적 평가대상에 따라 개별적으로 분석되어야 한다 [87], [6]. 반면에, Ilse 등은 오염방지 코팅을 적용하면 청소 주기 사이의 시간을 늘려주어 PV 운영자가 관련 비용을 줄일 수 있음을 보여주고 있다 [6]. 지역 기상 조건에 따라 오염방지 코팅만으로도 20~50%의 비용 절감을 달성할 수 있다.

옥외와 실험실에서의 시험을 통해, 건조(arid) 지역에 대한 5 가지 건조 및 습윤 오염 메커니즘이 확인되었다 [23]: 리바운드, 부유, 케이킹, 교결과 물 청소. 오염방지 코팅으로 오염을 최소화하기 위해서는 이러한 각 메커니즘이 다루어져야 한다. 그러나 물리적 현상으로 인한 제약도 고려되어야 한다. 여기에는 오염율과 주기적인 기상 변동과 같은 사이트 관련 인자들이 포함된다. 또 다른 중요한 문제는 입자 점착에 관한 일반적인 물리학, 특히 직경 20 μm 미만 먼지 입자의 물리학이다. 일반적으로 이슬과 결합할 때 이 입자들은 바람에 의해 제거되지 않으며 많은 양의 오염에 기여한다 [6], [50], [118], [119].

오염방지 코팅 장착 PV 모듈의 최적화된 청소 프로세스 측면에서 Lorenz 등은 그림 31 과 같이 기준 모델을 기반으로 비가 오는 해와 건조한 해에 대한 오염의 영향을 시뮬레이션하였다 [120]. 기준은 1985 년부터 2010 년까지의 경험적 데이터에 기초한 사우디아라비아 Riyadh 의 전형적인 연도를 나타낸다. 그림 32 와 같이 전형적인 연도에는 연간 경제적 생산에서 3.2%의 흑자가 달성되고, 건기와 우기에는 각각 3.34%와 3.24%의 흑자가 달성될 수 있다.

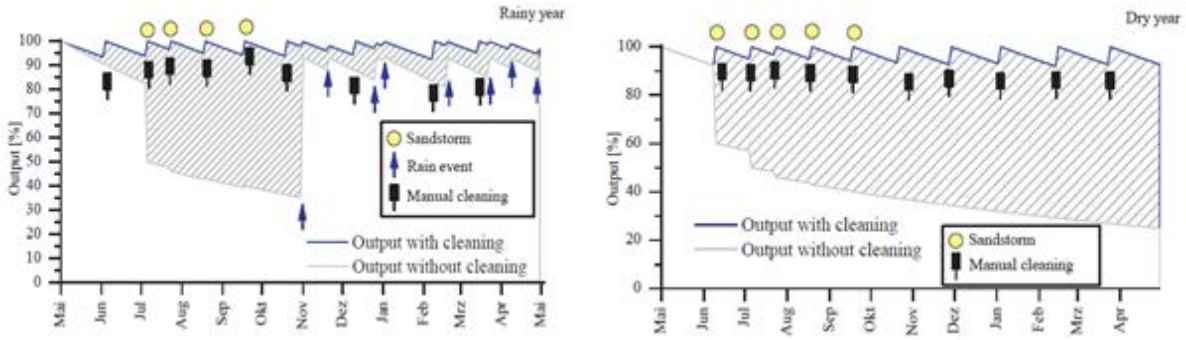


그림 31: ASC 를 갖춘 PV 모듈의 최적화 청소 프로세스, 오염의 영향 [120].

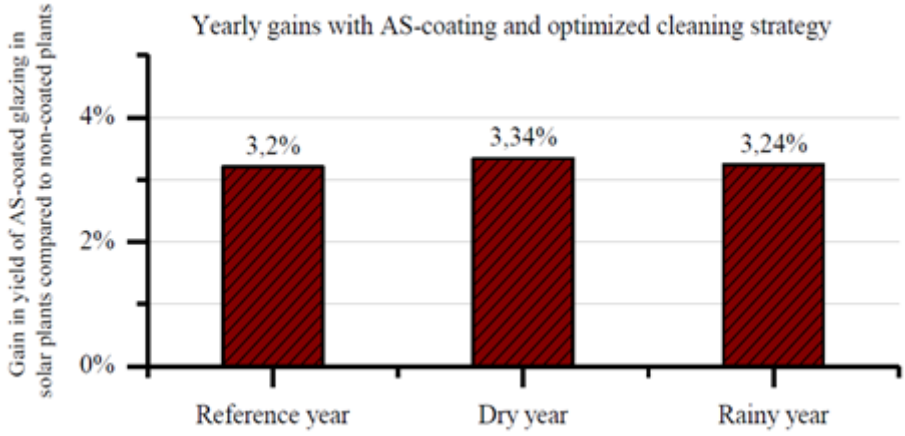


그림 322: 오염방지 코팅과 최적화된 청소 전략을 통한 연간 이득 [120].

투과율 데이터를 기반으로 청소를 보다 용이하게 만드는 특성이 출력 손실을 더 줄이는 결과를 가져왔다. 따라서 오염방지 코팅의 장점은 자연적인 청소 방법으로 인한 청소 프로세스의 감소이다. 다시 주목할 점은 이러한 장점을 달성하기 위해서는 오염방지 코팅이 지역 조건에 따라 신중하게 선택되어야 한다는 것이다. 또한, 모든 기후 지역을 대상으로 긴 수명을 보장할 수는 없으며, 일부 오염방지 코팅은 자체적으로 투과율 손실을 증가시킬 수 있다 [8].

반면에, 조사 결과 오염방지 코팅이 없으면 심한 오염으로 인해 6 개월 이내에 최대 -80%에 달하는 막대한 효율 손실이 확인되었다 [68]. Mondal 등은 시험 사이트와 기타 경계 조건에 따라 성능 손실이 최대 20%까지 발생한다고 보고하였다 [121]. 그러나 오염방지 코팅 사용에 따른 이익은 주로 청소 비용 절감을 통해 달성되므로 투자수익률(ROI)과 관련하여 10 년 후에는 1 €/m² 미만의 비용이 발생해야 한다 [6].

마모의 영향은 예측할 수 없는데, 청소 공정 외에도 연마성 모래폭풍(먼지 조성, 형상, 크기)과 환경이 오염방지 코팅의 사용 수명에 영향을 미치기 때문이다. 다른 종류의 오염방지 코팅(친수성의 기공성 실리카와 소수성 폴리머)으로 덮인 면적(백분율)의 조사를 통해 일부 경우에는 오염물질의 마모 특성 때문에 건식 브러시로 인한 손상이 상당하다는 것이 확인되었다. 여기서 사용된 청소 방법은 건식 브러시, 저압 물 스프레이, 젖은 스폰지와 고무 롤러이다 [115].

최근 연안 기후를 대표하는 덴마크에서 수행된 연구에 따르면 실내 시험에 반영하기 어려운 옥외 복합 스트레스 시험 외에도 오염방지 코팅의 수명은 표면의 품질과 균질성에 의해 영향을 받는다 [122]. 코팅을 하기 전에 표면이 손상된 경우라면, 예를 들어 기포의 발생 등을 통해 열화는 손상을 가속시킨다.

IEC 62788-7-3 또는 VDI 3956-1 과 같이 사전에 수명을 시험하기 위한 많은 표준 방법이 있지만, 청소 방법과 소재의 선택은 기후, 오염 유형과 오염 텍스처 그리고 오염 메커니즘에 맞추어져야 한다.

6.1.3 새로운 모듈과 플랜트 개념

오염으로 인한 투과율 손실은 유리의 경사각도에 크게 의존하는 것으로 널리 보고되고 있다 [123], [12]. 특히, 오염 손실은 경사각이 90º 일 때 가장 낮다. 중력은 오염 입자가 표면위로 침강하는데 영향을 미치는 중요한 요소로서 경사각도 의존성을 부분적으로 설명할 수 있다. 일반적으로 야간에 PV 모듈의 전면에 이슬이 형성되면 유리 표면에 먼지의 부착력이 강화된다. 이러한 관측은 (i) 수직으로 장착된 모듈은 오염의 영향을 가장 적게 받고, (ii) 좌우로 비스듬히 장착된 양면형 모듈의 후면에는 오염 퇴적이 무시할 정도이며, (iii) 야간에 단면형 모듈의 전면을 아래로 뒤집으면 오염 퇴적과 점착력을 줄일 수 있음을 시사한다. 이 절에서는 현장 실험을 기반으로 한 이러한 방법의 효과에 대해 논의한다. 이러한 방법들을 통한 오염의 감소도 정량화된다.

실험은 인도 Mumbai IIT Bombay 캠퍼스에 있는 8 층 건물 옥상의 테스트 현장에서 수행되었다 [124], [125]. 사이트의 지리적 좌표는 19.13ºN, 72.19ºE 이며 뭄바이는 따뜻하고 습한 기후를 가지고 있다. 모듈의 전류-전압 특성 측정은 다중채널 커브 트레이서(Daystar MT53200)를 사용하여 주기적으로 실시하였다. 오염 손실을 평가하는 데는 결정질실리콘 모듈 쌍을 사용하였으며, 각 쌍 중 하나는 매일 청소하고 다른 하나는 오염을 그대로 두었다. 오염 손실은 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다,

$$Soiling\ Loss\ (\%) = \left(1 - \frac{Energy_{Soiled}}{Energy_{Cleaned}}\right) * 100 \quad \textbf{(15)}$$

여기서

- 하루 동안 측정된 순간 출력을 적분하여 에너지를 구한다.
- 오염율은 오염 손실 대 일 수의 기울기로 정의된다.

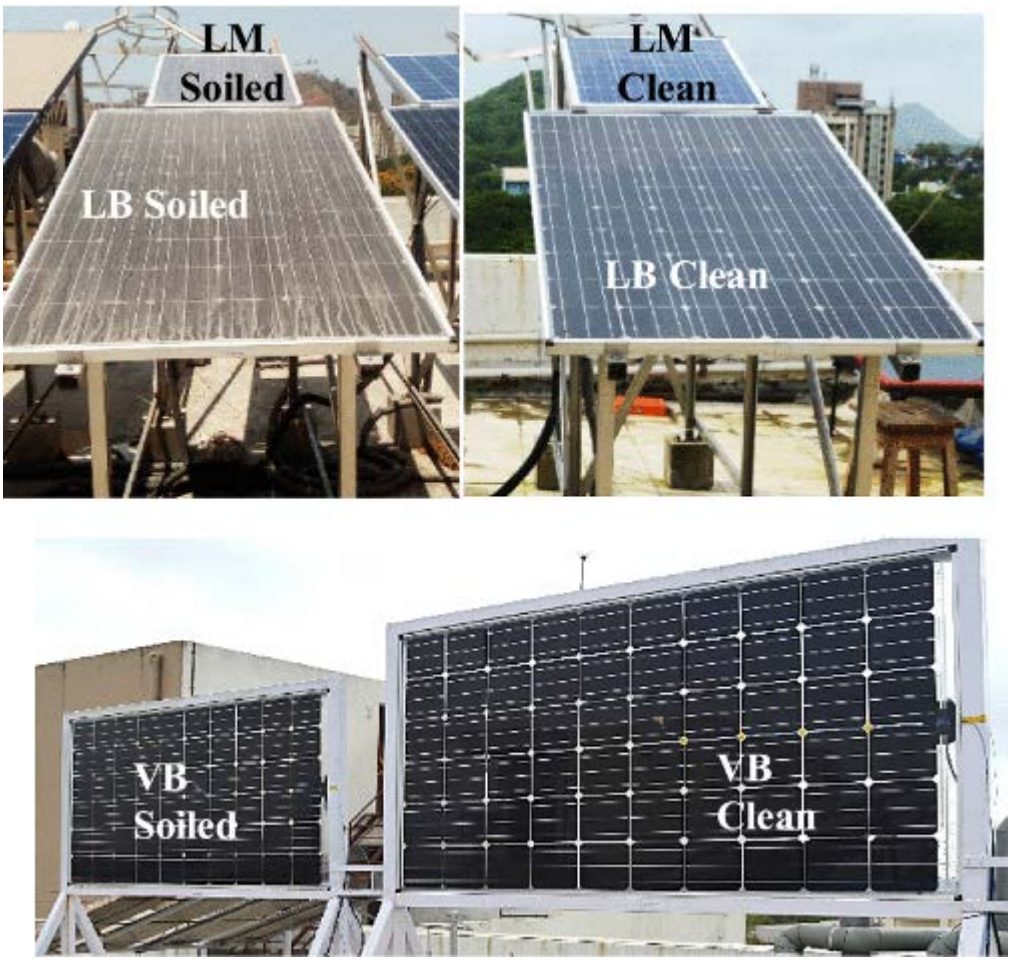


그림 33: 수직으로 장착된 양면형 모듈을 사용한 실험 시설.

(i) 동-서 방향으로 수직 장착된 양면형 모듈

모듈을 수직으로 장착하면 오염 손실을 줄일 수 있지만, 하루의 절반 동안만 상당한 에너지를 생산하기 때문에 단면형 모듈의 경우 에너지 산출량이 줄어든다. 이 문제는 부분적으로는 높은 양면형 특성(bifaciality)을 가진 양면형 모듈로 해결된다. 만약 양면형 모듈이 동서 방향으로 수직으로 장착된다면, 동쪽을 향한 쪽은 오전에 더 많은 에너지를 생산할 것이고 서쪽을 향한 쪽은 오후에 실질적인 에너지 생산자가 될 것이다.

실험에서는 두 개의 단면형 모듈(STC 측정 100 Wp)과 네 개의 양면형 모듈(공칭 양면형 계수 90%; STC 측정 전면 229 Wp, 후면 209 Wp)이 사용되었다. 단면형 모듈과 2 개의 양면형 모듈은 모두 19° 경사각도로 설치되었으며, 각각 LM(위도 장착 단면형 모듈)과 LB(위도 장착 양면형 모듈)라고 칭한다. 이중 2 개의 양면형 모듈은 전면이 90° 의 경사각도로 서쪽을 향하도록 설치되었으며, 이를 VB(수직 장착 양면형 모듈)라 한다. 실험은 2017 년 12 월부터 2018 년 4 월까지 진행되었다.

그림 33 은 실험 20 일째에 설비의 사진이다. 수직으로 장착된 청소하지 않은 양면형 모듈은 비스듬히 장착된 청소하지 않은 모듈보다 눈에 띄게 오염이 덜 되었다. 그림 34 는 일반적인 실험일에 청소한 수직 장착 양면형 모듈의 출력 생산 프로필이다.

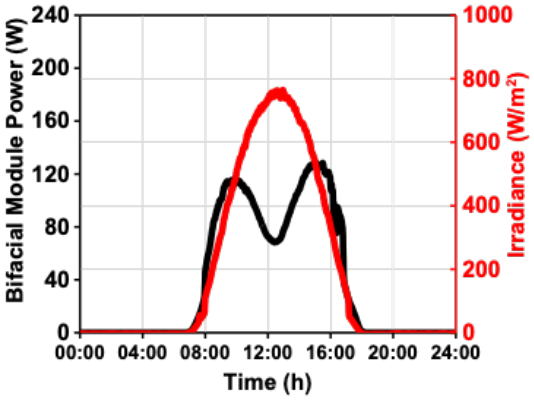


그림 34: 일반적인 실험일에 수직으로 장착된 청소한 양면형 모듈에 의해 생산된 출력.

그림 35 (a) 는 실험 날짜의 함수로서 세 쌍의 설비에 대한 오염 손실을 보여준다. 오염율은 LM 의 경우 0.45%/day 로 나타났는데, 이는 2013 년 이후 동일한 위치에서 수행한 실험과 일치한다 [126], [127]. LB 의 경우 오염율은 0.32%/day 로 나타난다. 모듈 후면의 오염 퇴적은 전면의 오염 퇴적에 비해 무시할 수 있는데, 이는 양면형 모듈 후면의 에너지 생성이 오염에 의해 크게 감소되지 않기 때문이다. 이 효과는 낮은 양면형 계수를 가진 모듈에서 덜 두드러졌다 [124]. 알베도가 높은 지역, 예를 들어 흰모래 사막은 이 효과로부터 더 많은 혜택을 얻을 것이다. 수직으로 장착된 양면형 모듈의 오염율은 위도 경사각도로 설치된 모듈에서 관찰된 것과 비교하여 무시할 수 있는 수준인 0.02%/day 이다.

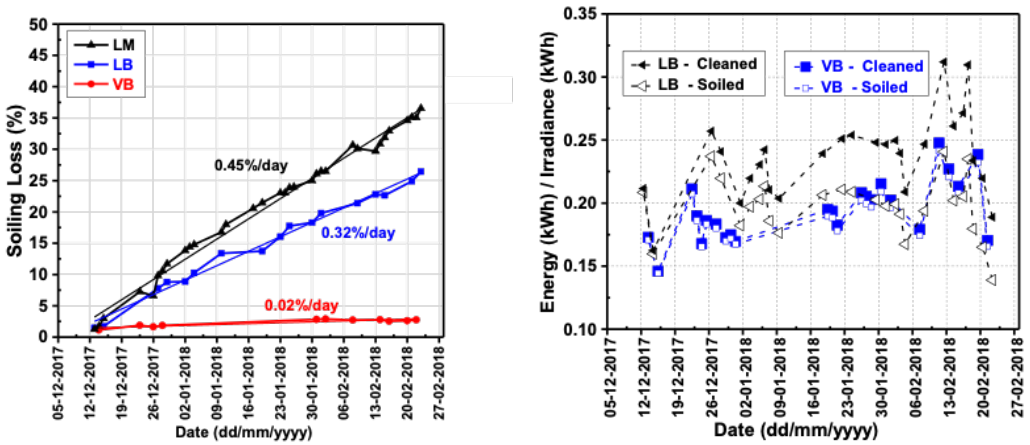


그림 35: a) 세 가지 다른 유형의 설비에 대한 오염 손실, b) 위도 경사각과 90° 경사각도로 장착된 양면형 모듈에서 산출되는 정규화된 에너지. 해당 위치에서 측정된 일일 일조량을 참고로 추가하였다.

그림 35 (b)는 LB 및 VB 모듈이 생성한 에너지를 매일의 조사강도(kWh)로 정규화한 것이다. 청소된 LB 모듈의 정규화된 에너지는 항상 VB 보다 높은 것으로 보인다. 그러나 오염된 LB 에 의해 생성된 에너지는 처음에는 VB 보다 높지만, 오염으로 인해 시간이 지남에 따라 감소하고 결국 VB 에 의해 생성된 에너지보다 낮아진다. 크로스오버는 약 7 주간의 현장 노출 후에 발생하는 것으로 보인다.

(ii) 햇빛이 없는 시간 동안에는 단면형 모듈을 거꾸로 뒤집어 놓음으로써 오염의 감소

2016 년 3 월 초부터 4 월 중순까지 실시한 이 실험에서는 명판 정격 90 Wp 인 모듈이 사용되었다. 한 개의 모듈은 실험 내내 위도 경사각도로 장착하고 매일 청소하였다. 위도 경사각도로 장착된 다른 다른 모듈은 청소하지 않았다. 세 번째 뒤집어 놓은(inverted) 모듈은 수동으로 레버 조작을 통해 모듈을 뒤집을 수 있는 구조로 장착되었다. 이 모듈은 낮에는 위도 경사각도로 두었고, 밤에는 거꾸로 뒤집어 놓았다. 이 모듈 역시 청소하지 않았다. 그림 36 은 두 개의 위치에 자리 잡은 세 번째 모듈을 보여준다.

그림 36: 왼쪽 사진은 낮 시간의 모듈이고 오른쪽 사진은 밤에 반전된 모습이다.

그림 37 은 고정된 모듈과 앞뒤 전환된 모듈에 대한 실험 날짜의 함수로서의 오염 손실을 보여준다. 오염율은 선형 회귀 분석에 의해 각각 0.45%/day 와 0.14%/day 로 추정되었다. 제안된 메커니즘은 오염율을 현저하게 줄임으로써 청소 빈도의 현저한 감소를 가져올 수 있다. 앞뒤 방향 전환(inverted) 모듈의 오염율이 낮은 것은 야간에 먼지가 유리에 더 적게 쌓이고 이슬이 더 적게 맺혀 먼지의 점착이 더 낮기 때문이다.

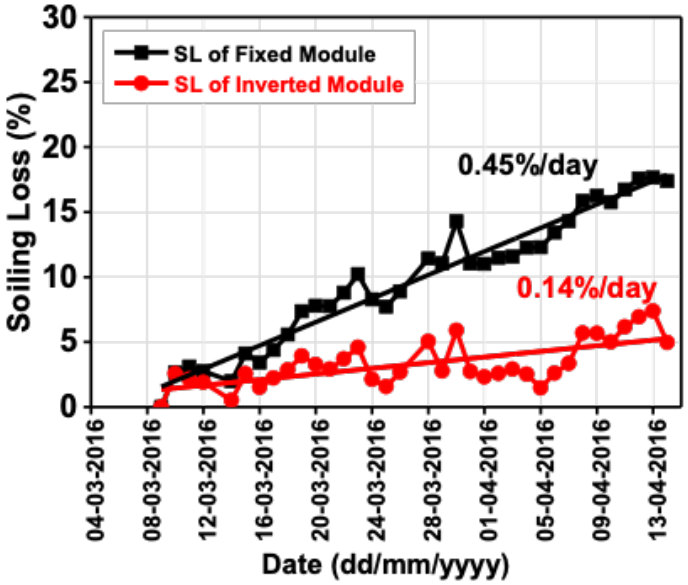


그림 37: 전체 실험 동안 위도 경사각도로 고정된 모듈의 오염 손실과 햇빛이 없는 시간 동안 뒤집어 놓은(inverted) 모듈의 오염 손실.

이러한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다:

- 위도 경사각도로 고정 장착된 양면형 모듈은 유사하게 장착된 단면형 모듈보다 오염으로 인한 손실이 더 낮다. 이는 양면형 모듈 후면의 오염이 낮거나 무시해도 될 정도이기 때문이다. 이 효과는 양면형 계수가 높을수록 그리고 알베도가 높은 곳에서 더 뚜렷할 것으로 예상된다.
- 수직으로 장착된 양면형 모듈의 오염 손실은 위도 경사각도로 장착된 양면형 모듈에 비해 무시할 정도이다. 뭄바이에서 청소하지 않은 두 모듈을 여름 7 주 동안 작동한 후의 조사에 의하면, 수직으로 장착된 양면형 모듈의 에너지 산출량이 위도 경사각도로 장착된 양면형 모듈보다 더 많았다. 그러나 플랜트 규모 확장 시에는 이런 모듈 어레이에서의 음영과 구조적 설계가 어려운 문제를 야기할 수 있다.
- 햇빛이 들지 않는 시간 동안 단면형 모듈을 뒤집으면 오염율을 크게 감소시키고 청소의 필요성을 크게 줄일 수 있다 (어떤 경우에는 완전히 제거). 이 방안은 특히 트랙킹 시스템에서 설치구조의 적절한 수정을 통해 구현될 수 있다.

6.2 시정적 완화 방법

6.2.1 청소 테크닉의 개요

특히 비가 거의 내리지 않고 밤에 이슬이 맺히는 건조한(arid) 지역에서는 모듈을 적극적으로 청소하는 것을 의무화 시킬 수도 있을 것이다. 전세계적으로 청소 솔루션 시장은 꾸준히

성장하고 있다. 솔루션에는 회전 브러시와 다양한 양의 탈염수를 사용하는 수동, 반자동 및 완전 자동화 시스템이 포함된다.

문헌의 분석으로부터, Mondal 등은 문헌의 분석을 통해 기후 조건에 기초한 청소 테크닉의 분류를 제안하고 있다 [121] (표 7).

표 7: 기상 조건에 따른 청소 테크닉의 제안, Mondal [121].

기상/지역	적용되는 청소 테크닉
사막	표면 진동, 공기역학적 스트림라이닝
건조	정전기 바이어싱(Electrostatic biasing), 자동 로봇 청소, 스프링클러
비가 많이 오는, 습한	특별한 테크닉이 요구되지는 않지만 반사방지 코팅과 결합 가능
추운, 습한	자동화/로봇 청소, 스프링클러 및 반사방지 코팅
눈	안전한 곳 집어 넣기/뒤집기, 반사방지 코팅
덥고, 건조, 햇살	정전기 바이어싱(Electrostatic biasing), 자동 로봇 청소, 스프링클러
구름, 음영	자동화/로봇 청소, 스프링클러, 공기역학적 스트림라이닝

통상적으로 청소 장치는 다음과 같은 네 가지 범주로 구분된다:

- 먼지 빗자루 및 물 브러시 같은 수동 장치.
- 물탱크를 수용할 수 있는 트럭 장착 장치 (물탱크 포함 가능).
- 휴대용 로봇을 사용하는 반자동 시스템으로 행에서 행으로 이동할 수 있다. 이러한 시스템은 배터리로 구동되거나 유선으로 연결될 수 있으며, 레일이나 프레임에 장착되거나 자유롭게 이동시킬 수 있다.
- 한 줄의 모듈을 정기적으로 청소하도록 설계된 완전 자동 시스템. 이러한 시스템은 종종 태양광으로 구동할 수 있으며 레일이나 프레임에 장착되거나 자유롭게 이동시킬 수 있다

특히 고압 물 청소의 경우, 모듈 제조업체는 일반적으로 모듈 청소에 가능한 최대 압력을 명시한다는 점에 유의해야 한다. 이 값을 초과할 경우 보증이 무효화될 수 있다. 6.2.4 절에는 모듈 청소 시험의 결과와 시뮬레이션한 청소 주기가 반사방지 코팅의 유무 또는 구조화 유리의 사용 유무와 관계없이 플로트 유리에 미치는 영향이 요약되어 있다.

Kurz 는 오차 한계가 감소함에 따라 청소에 의해 가능한 생산 이득의 중요성이 증가하기 때문에 청소는 경쟁적인 PV 프로젝트의 승패를 좌우하는(make or break) 요인이 될 수 있다고 결론짓고 있는데 [131], 현재 시장에서 가장 견고한 기술은 건식의 로봇 청소이다. 이런 기술들은 성숙도가 높아지면서 더 개선될 것이며, 그리고 자동화된 드론과 같은 다른 기술이 청소 장비의 계획과 운영을 더욱 향상시킬 것이다.

완전하지 않지만 표 8 은 네 가지 범주의 청소 솔루션 공급업체의 목록이다. 이 시장은 다소 역동적이며 다가오는 시즌마다 전용 박람회에서 새로운 발전이 선보이고 있다. 솔루션의 세부 정보를 볼 수 있는 홈페이지 주소(Uniform Resource Locator: URL)가 제공되어 있다.

표 8: 사용 가능한 청소 솔루션의 목록 [128], [121], [129].

수동	URL with further information, where available
Reach-IT Pro	
Kärcher	https://www.kaercher.com/int/
Unger	https://www.ungerglobal.com/en/applications/solar-cleaning
Cleantecs	https://www.cleantecs.com/en/products/solar-cleaner
IPCEagle	https://www.ipcworldwide.com/us/product/solar-panel-pure-water-cleaning-system/
트럭 장착	
SunBrush	https://sunbrushmobil.info/the-mobil-sunbrush/?lang=en
SolarCleaningMachinery SCM	http://scmsolar.com/
MERLO	
Rolhus	
BITIMEC	bitimec.com
Digcher	
Metalmeccanica	
hycleaner	https://hycleaner.eu/en/produkte/hycleaner-black-solar-2/
드론 장착	
BladeRanger	http://www.bladeranger.com/
SolarBrush	https://www.aerialpower.com/solarbrush/
Semi-Automatic Robots	
Sunpower	
Exosun	
SolarCleaningMachinery SCM	
Chemik	
Serbot	
Helios	http://www.pv-roboter.de/
Gekko Solar32	www.serbot.ch/images/documents/TD_GEKKO%20Solar_En_20- 13_06_06.pdf
완전 자동화	
Eccopia	http://www.ecoppia.com/technology/
Sol-Bright	
Nomadd	http://www.nomaddesertsolar.com/the-nomadd-technology.html
Serbot	
WashPanel	http://www.washpanel.com/prodotti.php
노즐 스프레이어	
Heliotex's 'automatic solar panel cleaning system	https://www.solarpanelcleaningsystems.com/photos.html?galItem=63&galAlbum=2&galTag=

6.2.2 시스템의 전기역학적 청소

태양광 산업은 PV 패널의 먼지와 모래를 청소할 수 있는 보다 비용 효과적이고 완전 자동화된 절수 가능 및 시간 절약 솔루션을 필요로 한다. 솔루션은 패널 표면을 손상시키지 않아야 하고 잦은 모래폭풍과 높은 대기 먼지 농도로 패널을 더 빈번하게 정기적으로 청소해야 하는 사막지역에서 출력 손실을 감소시킬 수 있어야 한다. 이러한 이유로 전기역학적 청소(Electrodynamic Cleaning System; EDS)는 특히 건조한 지역에서 태양광 패널, 태양 반사경(거울)과 유리 표면의 먼지를 제거할 수 있는 유망한 기술이다.

EDS 는 모래 입자의 하전(charging)을 기반으로 한 무접촉 방식의 전기역학적 청소 솔루션이다. 먼지 입자는 패널 전면 유리 아래에 일체화된 전용 전극에 인가된 고전압(kV 수준) 전기 펄스에 의해 제어되는 진행파(travelling wave)를 통해 모듈 표면에서 벗어나게 된다 (그림 38). 평행 전극들이 유리 또는 폴리머의 표면 안으로 내장되어 있고, 그 다음, 전자회로가 표면으로부터 멀어지는 쿨롱 힘을 통해 먼지 입자들을 부상시키고 밀어내는 진행파를 생성하게 된다.

Masuda 등]은 가변 전기장에 기초한 입자 수송을 최초로 시연하였다 [130].

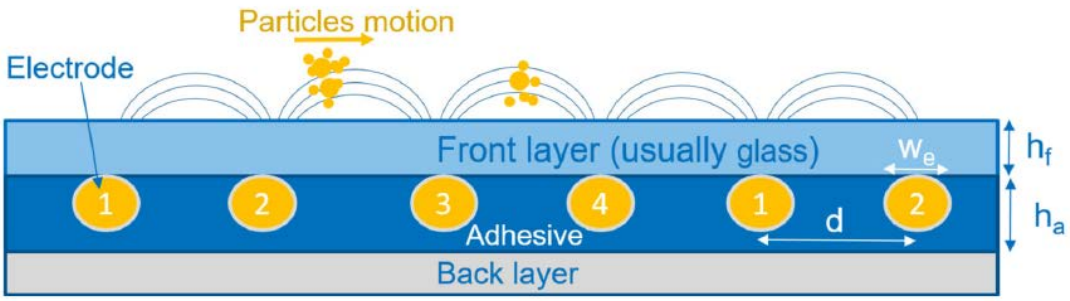


그림 383: 4 개의 와이어 전극을 사용하여 진행파(travelling wave)를 생성하여 먼지를 청소하는 EDS 단면도[131].

실제로, EDS 는 여러 독립된 전극에 번갈아 가면서 고전압을 인가하고 그리고 표면에서 입자를 이동시키는 진행파를 생성하면서 먼지 입자를 하전시킨다. 전극은 최종 용도에 따라 다양한 설계가 가능하다 (그림 39).

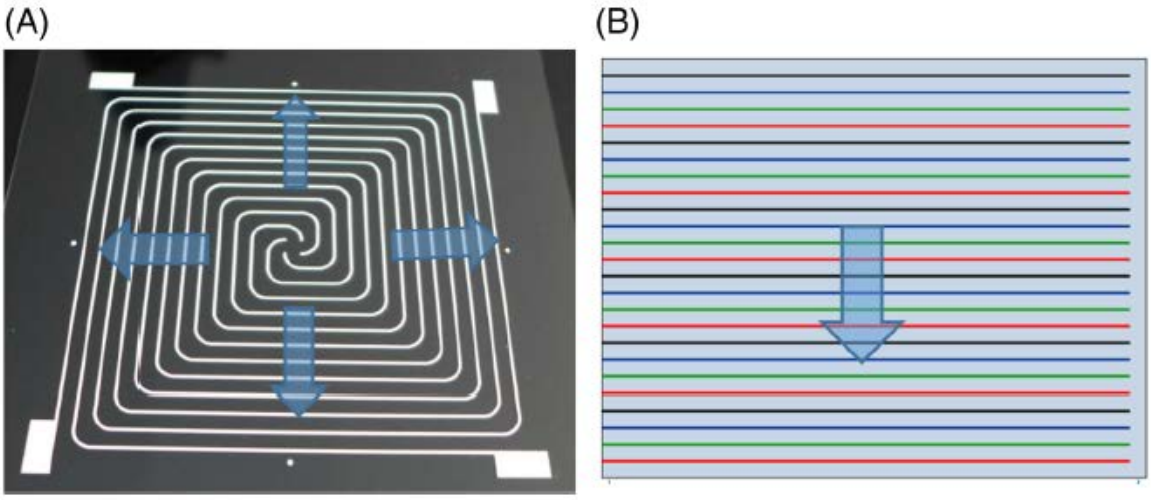


그림 39: a) 나선형 전극 설계도. b) 와이어 전극 설계도. 화살표는 입자 운동 방향을 나타낸다 [131]

CleanFizz SA 는 사우디아라비아 Thuwal 에 있는 King Abdullah University of Science and Technology(KAUST)에서 소형 파일럿 모듈을 시험하였다 (그림 40 참조). 내장 센서는 광도, 습도, 표면 온도 및 기타 필수 매개변수를 측정한다. 그 결과, 매번 작동 후 EDS 가 초기 20 초 이내에 축적된 먼지의 90% 이상을 제거한다는 것을 보여준다. 각 청소는 약 7 W(표준 PV 패널 전력의 약 3%)를 소비한다. 태양광 플랜트에서 더 많은 먼지를 보다 빨리 제거할 수 있도록 청소 동안에 트랙커를 사용할 수 있다.

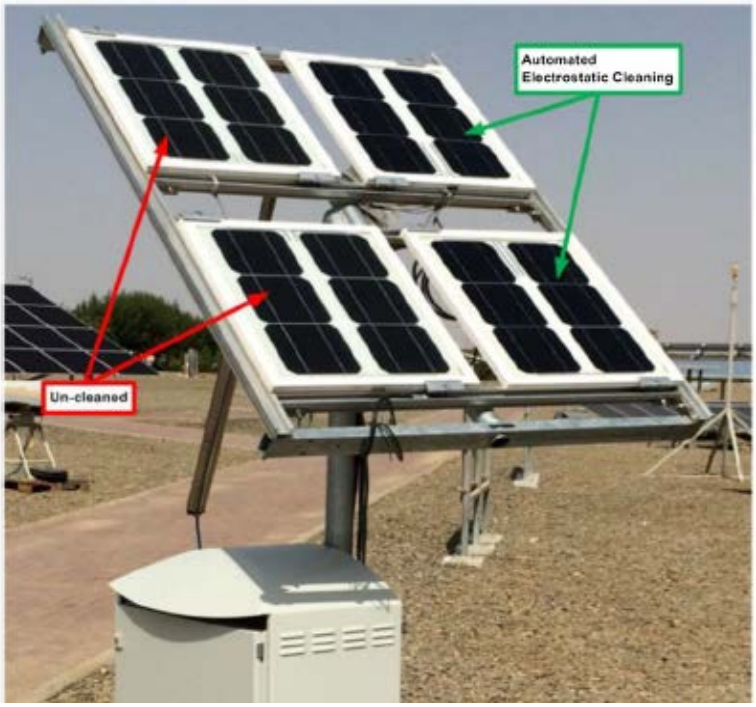


그림 40: 사우디아라비아의 KAUST 에서 Cleanfizz 전기역학적 시스템의 파일럿 시험 [131].

그 결과에 따르면, 청소하지 않은 기준 모듈에 비해 EDS 는 오염으로 인한 출력 손실을 36% 감소시킨 반면, EDS 를 작동시키기 위한 에너지 소비는 생산된 에너지의 0.1% 미만으로, 청소 시퀀스는 하루 6 회 발생하며, 각 시퀀스에 대해 PV 모듈 생산 전력의 10%가 사용된다. 하루 청소에 의한 손실은 약 20 초 동안의 발전 손실에 해당한다. 이러한 첫 번째 현장조사 결과는 전기역학적 접근법의 기능과 그러한 기능의 작동에 필요한 에너지가 무시할 수 있는 수준임을 보여준다.

이러한 현장 시험조건에서 EDS 는 72 셀 모듈 하나에 $10~20 가 소요되는데, 이는 모듈 비용의 약 10~20%에 해당한다 [131]

6.2.3 트랙킹 전략: 단일축 및 양축 트랙킹 시스템

단일축 또는 양축 트랙커에 장착된 모듈을 야간에 치우는 것은 오염을 완화하기 위해 쉽게 할 수 있는 솔루션이다. 오염은 모듈의 경사각에 따라 크게 달라지기 때문에 야간에 주차 모드로 전환하는 것은 실용적인 접근법이다. 아타카마 사막에서의 사례 연구에 따르면 트랙킹 솔루션은 매일 아침 안개와 태평양에서 불어오는 바람과 같은 조건도 고려할 수 있다.

그림 41 은 남아프리카 공화국 Pretoria 에서 2017 년 건조한 겨울 동안의 단일축 및 양축 트랙커의 일일 성능비를 보여준다. 겨울철 대기 중 부유 입자 물질은 열 생산용 바이오매스 연소의 증가에 의해 발생하므로 오염 손실 위험이 증가한다 [132]. 558 kWp 단일축 트랙커 시스템 (2 개의 트랙커)과 200 kWp 양축 트랙커 시스템 (17 개의 트랙커)은 Council for Scientific and Industrial Research(CSIR) 캠퍼스 내 N4 고속도로 남쪽에 인접해 있다. 비가 내리지 않은 2017 년 3 개월 건기 동안 두 시스템 모두 청소하지 않았기 때문에 오염율을 비교할 수 있는 합리적인 데이터 세트가 된다. 2017 년 양축 트랙커의 일일 성능비는 주당 0.4% 감소한 반면, 단일축 트랙커의 성능비는 주당 1.2% 감소하였다. 단일축 트랙커에서 2019 년 오염율은 매주 1.5~1.8% 범위로 측정되었다

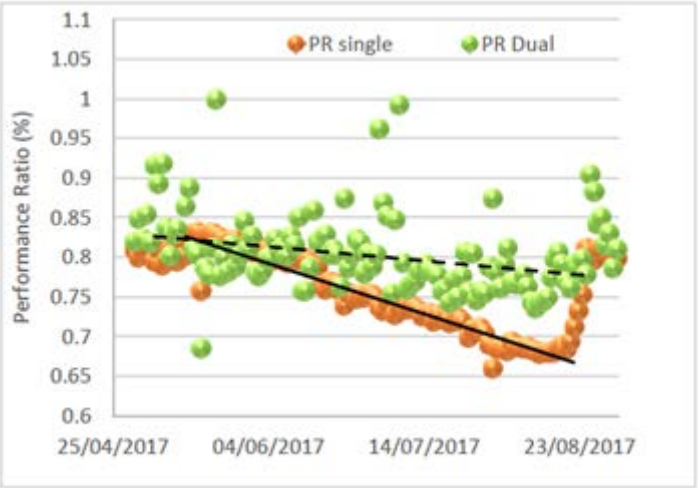


그림 414: 2017 년 건기 동안 단일축 및 양축 트랙커의 일일 성능비 추세, 단일축 트랙커에서 더 높은 오염율을 보여준다.

단일축 트랙커와 양축 트랙커의 오염 속도의 차이는 여러 메커니즘으로 설명될 수 있지만, 우발적인 데이터의 분석은 어떤 요인이 지배적일 수 있는지 결정하기에 충분하지 않다. 바람이 오염과 먼지를 지면에서 1~2 m 높이로 끌어올리기 대문에 지면에 더 가깝게 장착된

단일축 트랙커에 더 많은 오염을 초래할 수 있다. 단일축 트랙커의 모듈은 지면으로부터 0.5 m 이내에 있고 양축 트랙커의 모듈은 지면으로부터 3 m 이내에 있다. 경사각도가 오염율에 큰 영향을 미치기 때문에 작동 중 어레이의 방향이 보다 더 가능성 있는 설명일 수 있다. 겨울 동안 단일축 트랙커는 여름과 마찬가지로 태양 정오에 수평면 방향을 통과하는 동일한 경로를 매일 계속한다. 양축 트랙커는 일년 중 매일 경로를 변경하는데,, 태양 정오에서의 방향이 여름에는 0 도, 겨울에는 50 도 가까이 기울어져 있다. 양축 트랙커는 겨울철에 더 가파른 경사각에서 더 많은 시간을 보내기 때문에 어레이의 유효 면적이 수평면 방향에 비해 작고 그리고 중력으로 인해 먼지와 입자 물질이 덜 축적된다. 이 모델은 직달광과 어레이면 사이의 입사각 때문에 전류 생성의 코사인 손실과 유사하다. 야간에 양축 트랙커를 수직 위치에 보관할 수 있으면 오염율이 더욱 감소할 수 있다.

6.2.4 PV 모듈 청소 테스트

덥고 건조한 기후를 가진 사막에 점점 더 많은 PV 시스템이 설치되고 있다. 일부 사막에서는 오염으로 인한 성능 손실이 하루에 1%에 이를 수 있다 [8]. 이러한 높은 산출량 손실은 PV 모듈의 정기적인 청소를 통해 줄여야 한다. 빗물을 이용한 자연적인 청소는 불가능하기 때문에 건식 청소만이 경제적이다. 청소 동안 작은 먼지 입자가 유리 표면에 스크래치를 일으켜 유리 코팅의 광학적 특성을 떨어뜨리거나 청소 시의 기계적 힘이 모듈 내부의 셀을 손상시킬 수 있다.

청소 과정에는 청소 장치, PV 모듈, 오염, 물 및 청소제가 포함될 수 있다. 청소 프로세스를 검증하려면 계획된 구성요소를 사용하여 가속 시험을 수행해야 한다.

선형 브러시를 사용한 간단한 수동 청소를 제외하고 거의 모든 청소 장치에서 회전 브러시를 사용한다. 일부 프로토타입은 초음파와 전기력 또는 고압 공기를 사용하여 개발되었다 [133]. 일반적으로 브러시는 폴리아미드(PA) 또는 폴리에스테르(PE) 소재의 털로 제조된다. 브러시의 길이는 50 cm 에서 6 m 이상까지 다양하다. 브러시 직경은 최대 50 cm 에 이를 수 있다. 자동 시스템에서 모듈 하나의 청소 시간은 약 1~2 초이다. 폐쇄형 EVA 폼이나 PE 극세사 펠트가 있는 브러시는 브러시 털에 쌓인 먼지로 인한 긁힘을 줄이기 위해 사용되기도 한다.

청소 장치는 사고 예방, 전기 안전 및 전자기 호환성(EMC)에 관한 인증을 받아야 한다. 청소 장치의 평가는 기계류 지침을 사용하여 수행할 수 있다 [134]. 또한 청소 장치의 시험에는 전력 및 용수 효율성, 가혹한 환경(예: 먼지, 모래 폭풍, 고온, 강풍)에서 기계의 견고성 및 기능 데이터시트(예: 상승 경사, 청소 영역, 청소 속도)의 검토가 포함되어야 한다.

PV 모듈 청소에 대한 합격/불합격 기준을 가진 국제 성능 및 기능 관련 규격은 없다. 단, 자동차 청소, 유리창 청소 또는 페인트나 코팅의 내마모성에 대한 시험 규격이 적용될 수 있다. 실제 시험은 예상 먼지 노출, 대상 모듈의 유형과 청소 장치, 그리고 예상 사이클 수와 함께 하는 배치(configurations) 시뮬레이션이다.

비가 내리는 온대 기후의 모듈은 정기적으로 청소해야 하는데, 바이오 필름, 특히 동물이나 산업활동에 의해 야기된 것은 제거되기 어렵기 때문이다. 청소는 1 년에 한두 번 물로 해야 한다. 건조 후 유리에 잔류물을 피하기 위해서는 청소제 사용 유무의 선택과 함께 빗물 또는 탈이온수를 사용해야 한다. 열충격을 피하기 위해서는 물의 온도가 모듈 온도에 가까워야 한다. 모듈의 음영으로 인해 열점(hot spot)이 발생할 수 있다. 신뢰할 수 있는 시험을 위해서는 50 회의 청소 주기를 시뮬레이션해야 한다.

또한 청소에도 없어지지 않는 때(dirt)의 제거를 시험해야 한다. 청소 장치의 성능과 기능은 옥외 시험장이나 실험실에서 시험할 수 있다. 자연적이나 인공의 오염이 있는 기준 시험 플랜트의 분석도 유용하다. 시험 규격은 오염, 건조 및 자외선 노출 사이클 [135]로 유리의 오염이나 헤드라이트 [136]에 대한 인공 오염을 기술한다. Arizona 시험 먼지 [137], 석영 모래 그리고 애리조나 시험 먼지나 석영 가루로 구성된 습식 슬러리와 같은 건식 연마제도 마모 시험에 사용된다.

청소제는 생태적 지속 가능성과 기능성 및 PV 모듈에 미치는 영향에 대해 시험해야 한다. 염분 부식 시험과 유사하게 습윤 및 건조 단계를 통해 연속 및 주기적 시험이 이행될 수 있다.

건조한 지역에서는 적절한 청소용 물에 대한 접근이 어렵다. 그러나 건조한 사막에서도 밤에 이슬이 맺히면서 먼지와 유리 표면과 반응하여 오염의 교결(cementation)로 이어질 수 있다. 이 때문에 일부 플랜트는 야간에 매일 청소를 한다. 25 년의 작동 수명 동안 10,000 번의 청소 사이클이 시뮬레이션되어야 한다. 이렇게 많은 청소 사이클은 완전 자동 시스템에서는 일반적이다. 오염 비율이 약 95% 미만이라고 센서가 탐지했을 때 자주 발생하는 주간 또는 월간 청소는 수동, 트럭 장착 또는 반자동 시스템과 같은 다른 유형의 청소로 수행할 수 있다. 청소 장치의 효과와 파괴 효과는 특정 PV 플랜트의 오염 조건과 청소 빈도를 고려하여 시험해야 한다.

또한, 기준 플랜트의 평가가 기계적 응력 혹은 부분 음영(열점)에 의한 태양전지의 불량을 보여줄 수 있다. 또한 프레임과 클램프의 효과도 확인될 수 있다.

PV 마모에 대한 규격 IEC 62788-7-3 [139]의 초안은 침식 및 마모 시험 절차를 정의하고 있다. 이 시험은 PV 모듈 청소에 사용되는 것보다 작은 규격화된 브러시를 사용하여 작은 유리 샘플을 테스트하도록 설계되어 있다. 장치는 선형 마모 메커니즘과 연마 디스펜서(슬러리 또는 건식 연마제)를 포함한다. 건조 또는 습윤 슬러리 연마재의 유출 또는 분무를 방지하고 규폐(silicosis)의 위험을 방지하기 위해 (건조 연마재의 경우에 환기) 장치에 울타리를 치는 것이 좋다. 시험 방법은 태양광 모듈을 청소하는 동안 발생할 수 있는 손상 메커니즘을 모방하기 위한 것이다.

두 가지 청소 시험이 설명되어 있는데, 하나는 웨이빙 브러시를 사용하는 것이고 다른 하나는 회전 브러시를 사용하는 것이다. 벽 페인트 시험 규격 ASTM D2486 [140] 또는 DIN 53778-2 [141]의 요건을 충족하는 선형 마모 장치가 사용되었다. 브러시 블록의 면적은 3.5 cm x 8.5 cm 였다. 브러시 털은 브러시 블록에서 3.8 cm 까지 확장되는 직경 0.23 mm 의 나일론 6.12 로 구성되었다 (그림 42). 그림 43 에는 세 가지 유형의 유리에 대한 결과를 보여준다.

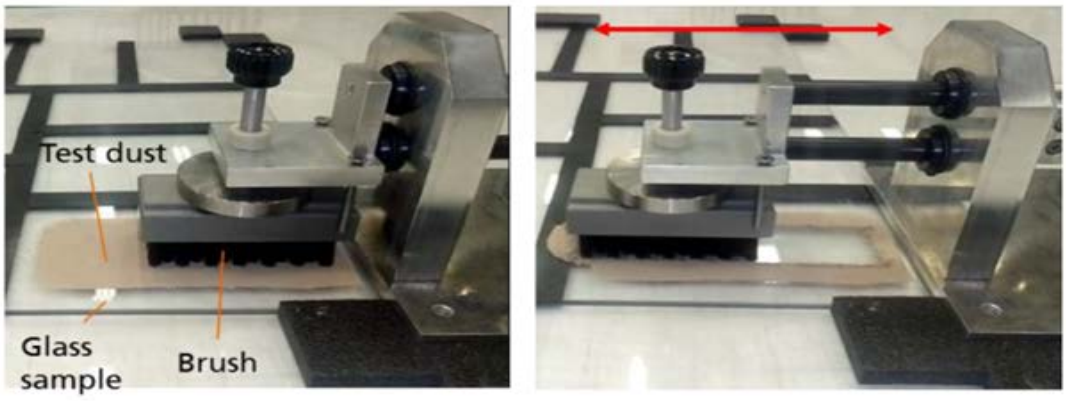


그림 42: ASTM D2486 의 브러시를 사용한 선형 마모 시험 장치 [142].

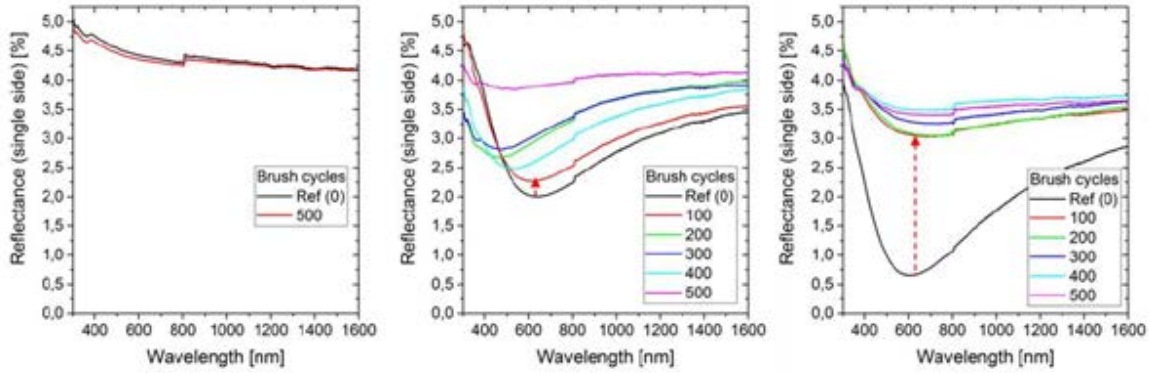


그림 435: 3 가지 유형의 유리의 분광 반사율: a) 반사방지 코팅(ARC)이 없는 플로트 유리, b) ARC 가 있는 플로트 유리, c) ARC 가 있는 구조용(structured) 유리 - ASTM D2486 [142]에 따른 브러시를 사용한 500 회까지의 선형 마모 시험 사이클 후.

회전 마모 시험에는 크기는 더 작지만 ISO 20566 [138]과 유사하지만 장치가 사용되었다. 브러시 블록은 길이 3.5 cm, 직경 2.4 cm 이상의 둥근 원통이었다. 브러시 털은 브러시 블록에서 3.8 cm 까지 확장되는 직경 0.23 mm 의 나일론 6.12 로 구성되었다. 털의 윤곽은 둥글었고, 길이를 따라 폭이 줄거나 하는 다른 기하학적 변화는 없었다. 브러시 아래에 시험 샘플이 담은 시험 패널 홀더는 브러시의 회전에 따라 양방향으로 움직였다. 브러시는 스프레이 제트에 의해 직접 고정이 된다.

IEC 62788-7-3 은 주로 유리 코팅의 평가에 사용될 수 있다. PV 청소 장치의 평가를 위해 1~3 개의 PV 모듈과 일반적인 작동 매개변수 (예: 속도, 회전과 압력)를 가진 오리지널 브러시가 사용되었다.

PV 모듈의 청소 지속가능성을 시험하는 일반적인 절차는 다음과 같다

- 전처리(preconditioning) (부드러운 청소, 광조사(light soaking))
- 초기 측정 (육안검사, P_{mpp}, EL)
- 특별 측정 (반사율)
- 시험 (가속 청소)
- 최종 측정 (육안검사, P_{mpp}, EL)

- 특별 측정 (반사율)

Ferretti 는 물로 작동하는 수동 청소 장치와 회전하는 건식 극세사 펠트를 사용한 청소 시험 장치 두 가지를 비교하였다 [143]. 반사방지 코팅이 적용된 8 개의 모듈이 테스트되었다. 여러 유형의 모듈은 청소 후 반사율에 심한 편차를 보였는데, 이는 ARC 가 제거되었음을 나타낸다. 미세하고 거친 모래 [144]를 펼친 후 나일론 브러시로 청소한 후의 반사율 측정 결과, 건조한 조건에서는 TABER 연마기 [145]를 사용한 경우보다 마모가 적었음이 확인되었다.

PV 모듈 청소 시험, 특히 유리 코팅에 대해 제안된 합격/불합격 기준은 최대 30%의 반사율 증가이다 [146]. 이 기준은 후면에 광포획(light trap)이 있는 PV 모듈 및 유리 시트에 사용될 수 있다. 최대 전력 손실이 5%인 PV 모듈 시험의 가장 일반적인 합격/불합격 기준보다 훨씬 어렵다. 반사율이 4%인 표준 유리의 경우 1.2%의 출력 손실을 의미한다. ARC 유리의 경우 훨씬 더 어렵다. 반구(hemispherical) 반사율은 적분구(integrating sphere)를 사용하여 실험실에서 측정할 수 있다. 소형 휴대용 분광계로 현장에서의 측정이 가능하다. 측정의 반복성도 고려되어야 한다.

ARC 의 유무와 함께 풀 사이즈의 구조용 유리(structured glass) 시트를 사용한 시험은 연마재 없이 수행되었다. 10,000 사이클 후 브러시에 무게를 추가하여 브러시 압력을 높인 결과, ARC 가 없는 유리의 경우 마모 효과는 측정되지 않았으나 코팅된 유리의 경우에는 상당한 영향이 탐지되었다 (그림 44 참조). 청소로 인한 마모력은 유리 표면과 평행하다. 표면에 수직인 마모력을 가진 모래 마모 시험과 비교하여, 코팅되지 않은 유리에 미치는 영향은 미미하다 [147].

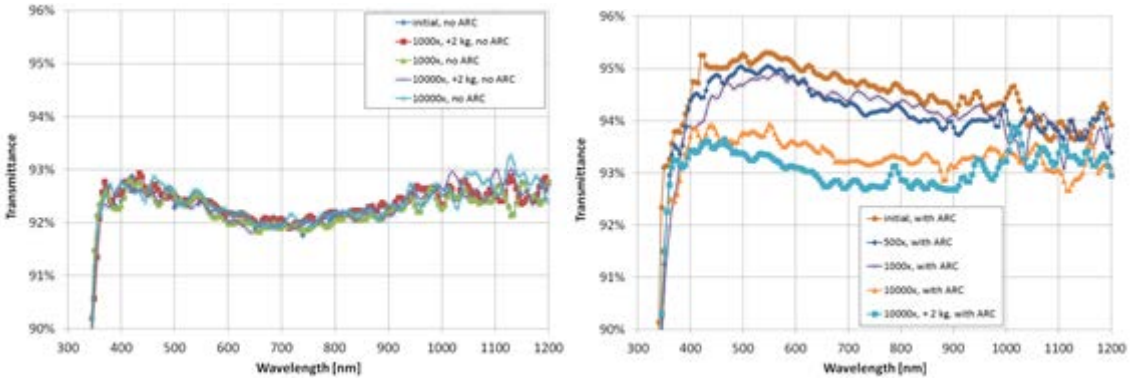


그림 44: a) ARC 가 없는 구조용 유리 b) ARC 가 있는 구조용 유리: 최대 10,000 사이클과 선택적으로 2 kg 의 추가 중량을 가지고 청소 후 ARC 유무 구조용 유리의 분광 투과율. ARC 가 없는 유리에 대해서는 어떠한 영향도 측정되지 않았다. ARC 를 사용한 유리에서는 상당한 영향이 측정되었다.

Ferretti 등은 유리 표면의 ARC 마모와 스크래치에 초점을 맞추어 ARC 유리 시트를 시험하였다 [146]. 3 일에 한번씩 모래 폭풍과 25 년의 운영 기간을 시뮬레이션하기 위해 3,100 번의 청소 사이클을 수행하였다. 오염의 경우에는 유리 시트에 미세한 (직경 0.18 mm) 모래와 굵은 (직경 0.38 mm) 모래를 유리 면적의 60%가 되도록 뿌렸다. 서로 다른 코팅을 가진 구조화된 유리와 플로트 유리를 동일한 조건에서 시험하였다. 서로 다른 브러시의 영향을 확인하기 위해 두 가지 유형의 브러시가 청소에 사용되었는데, 하나는 폴리에스테르

다른 하나는 나일론으로 제작된 것이다. 반사율 측정과 육안검사는 500 번의 청소 주기마다 수행되었다. 두 브러시 모두에서 사이클 수가 증가함에 따라 반사율이 지속적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 ARC 가 제거되었음을 나타낸다. 나일론 브러시의 경우 반사율의 증가가 더 높았다. 그 결과 미세 모래가 굵은 모래보다 연마 효과가 높은 것으로 나타났다.

오염과 청소 마모를 위해 서로 다른 지역과 소재의 먼지가 조사되었다 [50]. 주로 코런덤(corundum)으로 구성된 시험 먼지(직경 = 20 μm)의 연마 효과는 아리조나 시험 먼지로 사용한 석영과 방해석보다 강했다.

풀 사이즈 브러시와 오리지널 강화유리 시트로 시험하기 위해 하나의 새로운 규격(DINspec4867 [148])이 개발 중이다. 이는 자동차 코팅의 스크래치 내성 시험용인 ISO 20566 을 기반으로 한다 (그림 45 참조).

그림 45: ISO 20566 [149]에 따른 코팅의 스크래치 내성 시험을 위한 실험실 카 세척.

6.3 포괄적인 “청소 최적 시간” 모델 “

위에서 언급한 바와 같이, 오염은 일간 및 계절적 변동성을 가지며 지역 조건에 의존한다. 이러한 모든 인자들은 단기 오염 손실에 상당한 영향을 미치며, 이는 연간 평균 손실보다 예측하기 더 어렵게 만든다 [87].

오염의 정도와 지속시간을 모니터링하는 것은 O&M 관점에서 중요하다. 유지보수 외에도 모듈 청소의 최적 시기를 알면 경제성을 극대화하는 데 도움이 될 것이다. 이 청소시간은 모듈의 오염율과 정도 그리고 모듈 청소의 경제적 영향에 따라 알려질 수 있 있다.

청소하기에 가장 좋은 시간을 결정하려면 품질이 좋은 실시간 데이터나 향후 오염을 예측하는 좋은 오염 모델이 필요하다.

4.1 절에서 논의한 바와 같이 오염율의 모델링과 예측에는 다양한 접근법이 있다. 하나는 월평균 오염율을 사용하여 일일 오염율을 계산하는 것이다 [63]. 누적 오염은 비가 내리지 않는 사이트에서 매일의 오염율을 합산해 산출할 수 있다. 하루에 1 mm 이상의 비가 내릴 경우 오염 수준을 0 으로 재설정할 수 있다 [63]. 이 접근법은 미래의 오염 수준을 예측하기 위해 사이트에서 약간의 오염 데이터와 과거 강우 데이터를 사용할 수 있다. 다른 접근법은 다양한 환경 조건을 기반으로 한 오염을 계산하기 위해 인공 신경망을 사용한다 [1]. 이는 계산상 더 복잡하지만 지역 환경 인자들에 기초하여 개별 청소 이벤트 사이의 오염율을 더 정확하게 예측할 수 있다. 이 접근법에서 결정된 누적 청결 지수의 사례는 그림 46 과 같다.

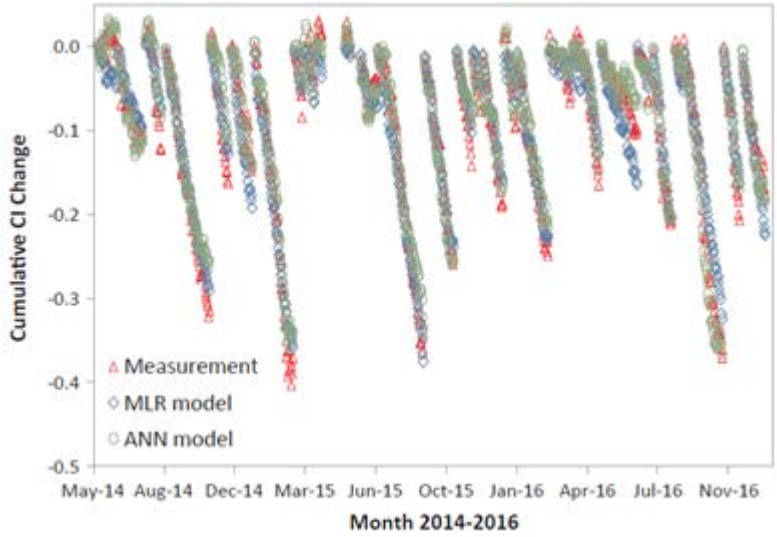


그림 46: 고급 신경망에 의해 예측된 누적 청결 지수 [1].

청소 빈도의 최적화를 위한 다양한 접근법이 있다. 가벼운 오염에서 중간 정도의 오염이 있는 지역에서는 폭우가 오염을 제거하는 데 효과적인 것으로 간주되고 모듈의 출력을 회복하므로 정기적으로 청소할 필요가 없다 [64]. 제거하기 어려운 오염의 장기간 축적으로 인해 모듈의 출력 산출량이 원하는 출력 이하로 떨어지는 경우 청소가 필요하다 [64]. 청소는 수동으로 [150] 그리고 전통적으로 물로 하는데, 이는 상당한 비용에 시간이 많이 소요될 수 있다. 다른 청소 솔루션은 오염을 제거하기 위해 투자 비용이 높은 자동화된 시스템을 사용한다. 청소가 비용 효과적인지에 대한 결정은 오염율, 전기 가격 및 현장의 인건비에 따라 달라진다. 유럽 중북부 일부 지역에서는 더 낮은 오염율과 높은 강우량 때문에 PV 모듈을 청소하는 것이 비용 효과적이지 않다는 보고가 있다 [151]. 남유럽 지역에서는 모듈을 청소하는 것이 경제적으로 타당하다 [151]. 다른 연구에서는 간단하고 정기적인 주간 청소 사이클을 모범사례로 제시한다 [103].

청소 권장 시간은 현장 위치의 여러 인자들에 따라 달라지므로 최적의 청소 시간을 결정하는 것이 중요할 수 있지만 경제적 손실의 최소화가 중요한 인자가 된다. 청소하기에 가장 좋은 시간 또는 청소 간격은 플랜트의 출력 산출량, 전기 요금, 오염율과 청소 비용에 의존한다 [56]. 청소에 가장 적합한 시간을 결정하는 것은 총 청소 비용과 오염으로 인한 에너지 손실

비용의 균형을 통해 이루어진다. Jones, Baras 등은 다음 매개변수를 기반으로 하나의 시스템에서 최적 청소 간격(tc)을 결정하기 위한 상세 모델을 개발하였다 [56]:

- 인터벌 시작 시 청소 작업 비용 (C_c)
- 청소 사이의 인터벌 동안 오염으로 인해 손실된 에너지 값 (V_L)
- 인터벌 동안 판매된 에너지의 가치 (V_S)
- 오염으로 인한 출력 손실 ($L_S(t)$)
- 오염 없이 플랜트에서 생산된 출력 (P(t))
- 전기 요금 (R(t))

Jones, Baras 등은 여기에 대한 솔루션을 유도하였다 [56]:

$$\frac{V_L + C_c}{V_s} = \frac{L_s(t_c)}{1 - L_s(t_c)} \tag{16}$$

여기서:

- $L_s(t) = 1 - e^{(-at)}$
- a 는 모든 달의 시간당 평균 손실 계수

이 평균값은 다른 모델링 접근법에서도 사용된다 [63]. 하지만, 다른 환경 조건이 영향을 미칠 수 있다 [56]. 더 나은 접근법은 실시간 데이터 또는 모델링된 데이터로부터 계절에 따라 변하는 오염율을 사용하는 것일 수 있다 [1]. 이렇게 하면 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. Jones 가 개발한 모델의 출력 예는 그림 47 에 나와 있다 [56]. 최적의 청소 인터벌은 일년 내내 다른데, 이 특정 사이트의 경우에는 일년 중의 중간에 더 긴 간격이 권장된다.

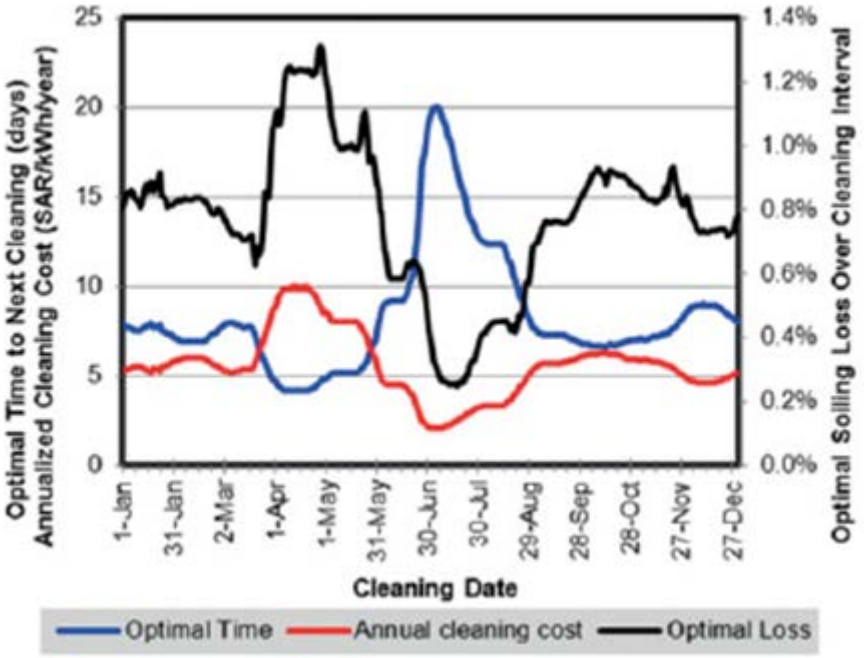


그림 47: 한 해 동안의 최적 청소 간격 계산 예. 출처: [56].

Jones 가 개발한 모델은 여러 경제적 인자들을 기반으로 최적의 청소 시간을 결정하는 데 사용할 수 있다 [56]. 이 모델을 사용하려면 실시간 오염 데이터를 수집하는 것이 권장된다. 이 값은 사이트에서 수집되고 월평균을 결정하는 데 사용될 수 있는데, 이 모델은 이 값을 사용하여 최적의 청소 시간을 계산할 수 있다. 이 접근방식은 청소 간격을 최적화하는 정확한 방법이어야 하지만, 표 9 와 같이 Mani [103]가 제안한 다양한 기후에서의 청소에 대한 몇 가지 일반적인 지침이 있고 이 지침은 O&M 결정에도 영향을 미칠 수 있다.

표 9: 다양한 기후에서의 청소에 대한 일반적인 권장 사항 [103].

기후대와 특징	PV 성능과 먼지 퇴적에 영향을 미치는 조건	먼지의 영향을 완화시키기 위한 권장 청소 사이클
Group-I: 저 위도 – 주로 습한, 습하고-건조 및 열대 건조 기후를 포함		
습한 열대 평균 온도: 20–34°C 연간 강수량: >250cm 위도 범위: 108S to 258N	저 위도 지역에서 태양에너지의 획득을 최대화하기 위해서는 낮은 경사각을 필요로 하지만, 그럴 경우 먼지 퇴적이 증가하게 된다. 먼지 퇴적을 줄이기 위해서는 위도보다 높은 경사각이 권장된다. 연간 강수량이 많으면 먼지 축적을 최소화할 수 있다.	연간 강수량이 많으면 먼지 축적을 최소화할 수 있다 (주기적인 세척). 건조 기간에는 주 단위 청소가 권장되며 먼지 축적의 강도에 따라 변경할 수 있다.

습한-건조 열대 온도 범위: 20–30°C 연간 강수량: >150cm 위도 범위: 158 to 258 N and S	건조 계절에 무역풍이 지배적이다; 북반구에서는 북동풍이 불며 더 높은 경사각이 권장된다. 지배적인 바람에 의한 청소 효과를 볼 수 있도록 PV 패널의 방향을 조정한다.	보통의 먼지 축적이면 주간 단위 청소가 권장되며, 먼지 축적이 심한 경우에는 일간 청소가 권장된다.
건조 열대 온도 범위: 20–49°C 연간 강수량: 15cm 위도 범위: 158 to 258 N and S	먼지가 많은 사막 환경과 먼지폭풍이 잦은 지역 (PV 배치에 무관) 낮은 습도와 강우. 태양에너지 복사가 강열한 여건 - 태양에너지 입사를 최대화할 수 있도록 PV 시스템을 최적화할 수 있다.	먼지 축적의 세기에 대응한 청소–최소 주간 단위 청소 권장 먼지 폭풍 시에는 즉시 청소 먼지를 접근하지 못하게 하는 코팅의 채택/적응을 고려
Group–II: 중 위도 기후 – 주로 스텝, 지중해, 초원 및 습한 대륙성 기후를 포함		
스텝 기후 온도 범위: -4 to 40°C 연간 강수량: 건조 지역에서 10cm 미만에서 습한 스텝에서는 50cm 까지 위도 범위: 358 to 558 N	고 위도에서는 높은 경사각이 필요; 연간 태양에너지 획득을 최적화하기 위해서는 더 낮은 고정 경사각도를 권장 일반적으로 경사각도가 높으면 먼지가 떨어져 나가는 경향이 있음	강우가 거의 없는 건조 기후와 경사각도가 높으면 보통의 청소 사이클(주 단위)이 적절할 수 있다. 경사각도가 더 낮으면(태양에너지 획득을 최대화) 보다 빈번한 청소(먼지 세기에 따라) 사이클이 더 좋을 수 있다.
지중해 기후 온도 범위: 10 – 40°C 연간 강수량: 42cm 위도 범위: 308 to 508 N and S	고 위도에서는 높은 경사각이 필요; 연간 태양에너지 획득을 최적화하기 위해서는 더 낮은 고정 경사각도를 권장 일반적으로 경사각도가 높으면 먼지가 떨어져 나가는 경향이 있음	패널 표면 위의 먼지 축적 속도에 따라 1 주 혹은 2 주에 1 회 청소 권장. 먼지 축적이 더 많은 지역(산업단지 인근)에서는 일간 청소가 더 좋을 수 있다.
초원 기후 온도 범위: -4 to 22°C 연간 강수량: 81cm 위도 범위: 308 to 558 N and S	고 위도에서는 높은 경사각이 필요; 연간 태양에너지 획득을 최적화하기 위해서는 더 낮은 고정 경사각도를 권장 일반적으로 경사각도가 높으면 먼지가 떨어져 나가는 경향이 있음 강수량이 더 많으면 PV 패널의 청소에 도움	1 주 혹은 2 주에 1 회 정도로 빈번하지 않은 사이클이 적절할 수 있다. 먼지가 더 많은 지역(인간 활동에 따른)은 주 단위 청소가 필요할 수 있다.

Group–III: 고 위도 기후 – 주로 타이가와 툰드라 기후 유형을 포함		
타이가 기후 온도 범위: -22 to 16°C 연간 평균강수량: 31cm 위도 범위: 508 to 708 N and S	고 위도는 수직에 가까운 높은 경사각도를 필요로 한다; 효과적인 태양에너지 획득을 위해 트랙킹 메커니즘이 필요할 수 있다. 주변 온도가 더 낮으면 PV 성능이 올라간다. 일반적으로 수직에 가까운 경사각도에서는 먼지가 떨어져 나간다. 먼지는 태양에너지 획득의 최대화에 비해 그 중요성이 떨어지는 인자이다.	주 단위 청소 사이클이 적절하다. 눈의 쌓임은 즉시(더 빈번하게) 해소하여야 한다.
툰드라 기후 온도 범위: -22 to 6°C 연간 평균 강수량: 20cm 위도 범위: 608 to 758 N	고 위도는 수직에 가까운 높은 경사각도를 필요로 한다; 효과적인 태양에너지 획득을 위해 트랙킹 메커니즘이 필요할 수 있다. 일반적으로 수직에 가까운 경사각도에서는 먼지가 떨어져 나간다. 주변 온도가 더 낮으면 PV 성능이 올라간다. 미세 먼지 수집에 취약	주 단위 청소 권장하며 축적된 먼지 유형(미세/굵은)에 따라 조정 눈의 쌓임은 즉시(더 빈번하게) 해소하여야 한다.

6.4 적설 영향의 완화 전략

겨울철 동안 어레이 성능을 향상시키려면 제설 작업도 필요하다. 모듈 표면에서 수동적으로 눈을 치우는 것은 슬라이딩, 용융 및 바람에 의한 제거로 구성된 복잡한 과정이지만, 슬라이딩은 일반적으로 최소 45°의 경사각도에서 가장 잘 발생한다. 폭설이 내리는 사이트에서는 60° 이상의 경사각도가 권장된다. 눈 흘러내림은 랙킹 구성에도 의존한다. 위쪽과 측면을 따라 인접한 모듈 사이 몇 센티미터의 공간이 슬라이딩을 방해할 수 있다. 모듈의 하단 가장자리와 지면 사이의 거리도 중요하다.

어레이와 지면 사이에 적어도 1 m 의 간격이 주어지면 눈이 쌓일 공간이 생기는 것이다. 지붕에 장착된 모듈과 같이 간격이 부적절한 경우 모듈 프레임 하단에 눈이 쌓인다. 마찬가지로, 커버 유리 위로 몇 밀리미터 돌출된 프레임의 불연속성이 눈과 얼음을 위한 발판을 제공할 수 있다. 프레임 길이에 비해 프레임 바닥 위의 눈의 무게가 클수록 하단 가장자리를 따라 쌓인 눈이 프레임 위의 눈 무게를 지탱할 수 있는 가능성이 줄어든다. 이러한 이유로, 지면에 평행하게 더 짧은 치수의 모듈 장착(가로(풍경화 landscape) 구성이 아닌 세로(초상화 portrait) 배열이 눈 흘러내림을 촉진할 것이라고 추정된다. 마찬가지로, 큰

모듈은 작은 모듈보다 눈 치우기가 더 잘 될 것이다. 물론 눈이 내리는 장소에서는 프레임 없는 모듈을 사용하는 것이 이상적이다.

다른 제설 방법으로는 정기적인 현장 방문이 있을 경우 가능한 수동 청소가 있다. 그러나 수동 청소는 시간이 많이 걸리고 추가적인 에너지 이득을 가져다 주지 못할 수 있으며 모듈이 손상될 수 있다. 다양한 조건에서 내구성과 작동성을 시험하기 위해 아이스포빅(ice-phobic) 코팅이나 나노 텍스처 유리와 같은 수동적인 용융 기술이 연구되고 있다. 어레이를 통과하는 전류 흐름을 뒤바꾸는 것과 같은 능동적인 용융 기술도 사용할 수 있다. 다양한 접근 방식의 이점을 정량화하려면 다양한 제거 기술의 현장 비교가 필요하다.

끝으로, 모듈의 전기적 상호연결이 에너지 손실에도 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 그림 48 에 나타낸 바와 같이, 일반적인 72 셀 모듈은 3 개의 바이오패스 다이오드를 가지고 있는데, 이는 각각 24 셀을 가진 3 개의 서브스트링과 연결되어 있다. 위에서 아래로 눈이 흘러내리기 때문에 표면에 눈이 남아 있더라도 일부 바이패스 다이오드 셀 스트링이 완전히 노출될 수 있도록 모듈을 가로보다는 세로 방향으로 배치하는 것이 유리할 수 있다.

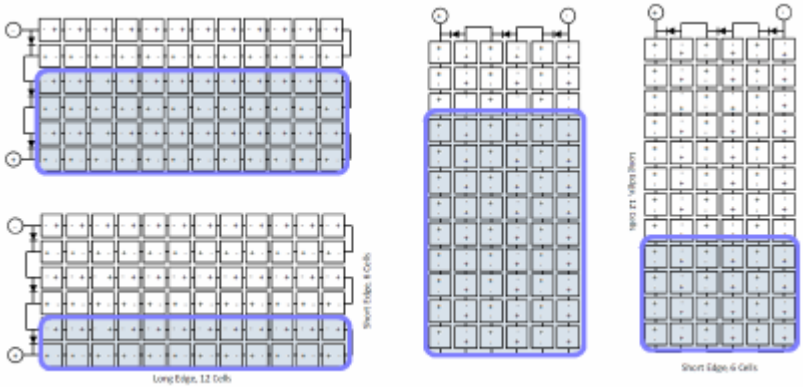


그림 486: 바이패스 다이오드가 있는 72 셀 모듈의 전기 다이어그램, 가로 및 세로 방향으로 점진적으로 눈이 흘러내리는 사례 (눈 층이 파란색으로 표시된 모듈 표면 아래로 움직임). 가로 방향에서 눈이 흘러내리면 모듈이 부분적으로는 여전히 눈에 덮여 있어도 바이패스 다이오드 스트링에서는 눈이 완전히 흘러내릴 수 있다.

가로 방향 설치가 바이패스 다이오드 스트링의 더 균일한 노출을 허용할 수 있지만, 하단 프레임을 따라 눈이 더 많이 축적됨으로 인해 세로 방향 설치에 비해 눈 흘러내림이 방해를 받을 가능성이 높다. 정션 박스에 내장된 바이패스 다이오드가 없는 드문 경우에는 모듈이 수직 열이 아닌 수평 행 그룹으로 직렬 연결되어야 한다. 끝으로, 트랙킹 시스템을 사용할 경우 모듈을 밤새 수직으로 위치시켜 눈 흘러내림을 촉진시킬 수 있다. 일부 운영자들은 일사량이 낮은 겨울철에 트랙커 작동을 정지시킬 수 있으므로 북반구에서는 어레이를 수직 경사각에 정남향으로 남반구에서는 수직에 정북향에 고정하여 신뢰성 문제와 전력 소비를 줄일 수 있다. 트랙킹 시스템은 원격 위치에서는 추가적인 복잡성이 발생하며 모터 오작동 또는 태양 추적 센서가 눈의 방해로 인해 추운 기후에서는 제대로 작동하지 않을 수 있다. 자세한 내용은 7 장을 참조하십시오.

7 눈에 의한 PV 시스템의 음영

7.1 서론

태양광시스템의 급격한 비용 감소와 화석 연료에 비해 호의적인 경제적인 전망에 상응하여 그 동안 최소의 태양 조사강도와 겨울의 지속적인 강설로 인하여 보급에 제한을 받았던 북부 지역에서 태양광 보급이 확산되고 있다. 하지만 PV 가 더 추운 기후에서 성능이 좋아져 경제적일 수 있지만, 이러한 성장에 수반하여 모듈 표면에 눈의 점착으로 형성된 눈 음영(snow shading)이 상당한 에너지 손실을 야기한다는 인식이 증가하고 있다.

문제는 광범위하다: 눈은 북반구 대부분과 양쪽 반구의 높은 고도에서 발생하며, 지배적인 기후 조건과 PV 어레이의 설계에 따라 며칠에서 몇 주 동안 지속될 수 있다. 지역적으로 그리고 전세계적으로 손실을 정량화하기 위해서는 더 많은 데이터가 필요로 하지만, 눈 음영은 PV 성능에 나쁜 영향을 미쳐 에너지 산출량을 감소시키고 균등화 에너지 가격을 증가시킨다. 전세계적으로 연평균 손실은 10% 이하로 추정되지만, 수입 손실로 이어지는 월간 에너지 손실은 최대 100%에 이를 수 있으며, 극단적인 상황에서 연간 측정 손실은 34%에 이를 수 있다 [152], [99], [153], [154], [155], [100].

동시에 북부 지역의 PV 성장은 높은 속도로 계속될 것으로 예상된다. [4] 예를 들어 독일은 2019 년 8 월까지 2.72 GW 의 태양광을 추가했으며 2030 년까지 총 설치 용량 98 GW 를 목표로 하고 있다. 노르웨이는 2018 년에 전년 대비 29% 증가한 23. 5MW 의 태양광을 가동하였으며 [5], 태양광의 가격 경쟁력을 긍정적으로 보는 스웨덴과 핀란드도 성장세를 보였다. 스웨덴은 현재 주로 스톡홀름 북부에 약 200 MW 의 태양광을 보유하고 있다 [156]. 미국의 경우 태양광 성장 상위 10 개 주 가운데 4 개 주가 북위 40 도 이상에 위치하고 있으며 알래스카에는 현재까지 66 도 이상의 위도에 7 MW 이상의 태양광이 설치되어 있다. 캐나다는 불과 13 년 만에 태양광 용량이 182 배 증가하였다. 러시아는 2019 년에 북위 54°N 의 극동 지역에서 75 MW 의 태양광을 가동하였다 [157]. 겨울에 눈이 지속적으로 내림에도 불구하고 PV 보급을 가속화하고 있는 또 다른 지역으로는 일본, 중국, 체코 등이 있다. 이렇게 성장이 예상됨에 따라 눈 음영을 줄이고 겨울에 태양광 성능을 향상시키도록 압력이 가해지고 있다 [6].

이러한 목표를 지원하기 위해서는 에너지 손실, 성능 모델링, 시스템과 구성요소 신뢰성, 설계 최적화와 O&M 모범사례 (그림 51)와 같은 눈 오염 및 PV 성능과 관련된 5 가지 주요 영역에 대한 연구가 필요하다. 또한 이 장에서는 눈의 음영에 영향을 미치는 근본적인 인자들의 개요를 제공하고 북위도의 PV 시스템에서 눈 음영 손실을 최소화할 수 있는 기회를 확인한다. 연간 조사강도가 급격하게 변화하는 지역에서 부하 관리를 개선하기 위해서는 전력 저장이 도움이 될 수 있는데 이 장에서 다루지는 않는다. 주택용이든 상업용이든 루프탑 PV 도 이 장에서 광범위하게 다루지 않는데, 이는 주로 1) 유틸리티 규모 시설에 적용되는 많은 동일한 원칙이 다른 규모에 적용되고 2) 경제적 동인이 매우 다르기 때문이다.

[4] Growth projections have been revised as a result of the COVID-19 pandemic, which is estimated to reduce the growth of global solar by 17% in 2020, with a rebound expected thereafter. [Wood Mackenzie]

[5] Growth projections have been revised as a result of the COVID-19 pandemic, which is estimated to reduce the growth of global solar by 17% in 2020, with a rebound expected thereafter. [Wood Mackenzie]

[6] Reference: http://acep.uaf.edu/media/293024/2020-Net-Metering-Update_20200309Final.pdf (June 2022)

7.2 고 위도에서 PV 시스템의 성능 인자

전세계 고 위도 지역의 PV 작동 조건은 혹독하고 예측하기 어렵다: 강수량은 차가운 비에서 폭설에 이르기까지 다양하다; 기온은 영하 40°C 부근으로 최저에 달하고 극적인 변화를 보인다; 눈 깊이는 1 미터 이상에 달하고 높은 조사강도의 상황이 발생할 수 있다. 눈이 자주 내리는 지역에서 PV 성장 수용능력을 이해하기 위해서는 먼저 태양에너지 자원의 가용성과 PV 시스템의 작동 효율성을 저해하는 기후 조건을 이해해야 한다

A. 태양에너지 자원 가용성

추운 기후에서 PV 시스템으로 에너지를 생산하면 문제와 이점이 모두 수반된다. 한편, 겨울철의 저온과 알베도는 어레이의 성능을 향상시키지만, 태양 대비하여 지축의 기울기에 의해 결정되는 태양의 높은 입사각과 PV 모듈에 입사되는 낮은 조사강도는 표준시험조건(STC)에 비하여 손실을 초래한다. 입사각이 클수록 셀에 더 적은 빛이 들어온다. 그러나 대부분 결정성실리콘 모듈의 경우 입사각 손실은 약 60°의 임계치에 도달할 때까지는 무시할 수 있다. 예를 들어 알래스카 Fairbanks(북위 64.8°)의 동지에는 태양이 지평선 위 약 2 도 정도로만 떠오르며 4 시간 미만 동안만 희미한 빛을 제공한다. 이와는 대조적으로 하지에서 태양의 높이는 지평선에서 49 도에 가까운 최고점에 달해 19 시간 이상의 낮 시간을 제공한다. 북 위도 지역 또한 넓은 범위의 방위각(여름에는 북동쪽에서, 겨울에는 남동쪽에서 태양이 뜬다)을 볼 수 있고 그리고 연평균 일조량은 더 낮은 위도에서의 연간 일조량과 비슷하거나 그 이상일 수 있다.

고 위도의 사이트는 겨울 동안 약한 햇빛이 지속되는 경우가 많은 반면, 높은 고도의 사이트는 PV 설치가 상대적으로 드물긴 하지만, 계절 내내 높은 조사강도 수준을 보이는 경우가 많다. Fairbanks [158]에서는 일반적으로 연간 평균 9 개월 동안 약 200 W/m^2 미만의 조사강도가 일반적인 경우, 출력 산출량과 조사강도 사이의 선형 관계가 깨지고 STC 에 비해 성능이 약간 저하될 수 있다. 이러한 감소는 기술에 의존하지만, 한 연구에서는 더 낮은 션트 저항 때문에 결정성실리콘에 비해 박막 CdTe 및 CIS 모듈의 손실이 더 큰 것으로 나타났다 [5]. 그럼에도 불구하고 입사각과 낮은 수준의 태양광으로 인한 겨울 동안의 성능 감소는 일반적으로 연간 에너지 생산량의 3% 또는 4%에 불과한데 이는 여름철의 일조량이 훨씬 더 높기 때문이다.

방위각의 넓은 범위는 북부 기후에서 양면형 모듈이 장착된 양축 트랙커에 대한 관심을 불러모았다 [159]. 그러나 고정된 설치에서는 때때로 태양이 모듈 뒤에 있을 수 있기 때문에 모든 직달 일조량이 발전에 이용될 수는 없다.

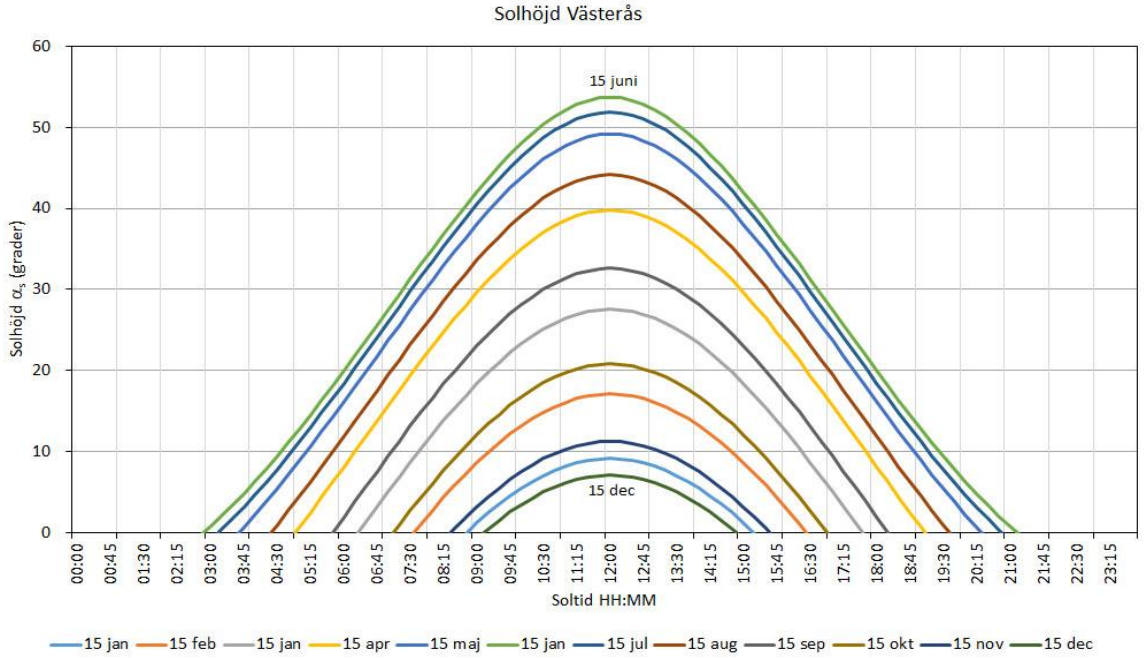


그림 49: 스웨덴에서 태양 고도의 계절적 변화는 태양이 12 월 중순에 절대로 10 도 이상 상승하지 않고 그것도 6 시간 동안만이라는 것을 보여준다. 대조적으로, 6 월 중순에 태양은 거의 55 도의 고도에 도달하고 약 18 시간 동안 지평선 위에 머무른다. 위도가 높을수록 이러한 차이는 더욱 극심해진다 (그림의 주축 레이블은 스웨덴어임).

B. 주위 온도

조사강도가 태양광 성능의 결정적인 요인이지만 온도 역시 중요한 변수이다. 변환 효율은 셀 온도가 감소함에 따라 선형적으로 증가한다. 이에 따라 저 위도에 비해 연중 작동 온도가 상대적으로 낮은 고 위도의 PV 시스템은 연간 기준으로 보다 우수한 성능을 발휘할 수 있다. 예를 들어, 결정질실리콘(c-Si) 태양전지는 섭씨 1 도 내려갈 때 효율은 약 0.34~0.38% 선형으로 증가하며, 높은 조사강도, 영하의 날 [SINGh16]에 가장 효율적인데, 예를 들어 카이로의 무더운 날보다 스웨덴의 비교적 시원한 여름 날에 더 좋은 성능을 발휘할 것이다. 이러한 박막 기술의 최대 제조업체에 [7],[8] 따르면, CdTe 와 CIS 태양전지의 온도 계수는 각각 25~75°C 에서 각각 0.32 %/°C 와 0.33 %/°C 로 c-Si 보다 약간 낮다.

C. 알베도

북반구 위도에서는 매년 몇 달 동안 지속적인 적설이 존재하며 이것이 PV 시스템의 효율에도 기여한다. 반사율이 높은 백색의 바탕 표면은 1 에 근접하는 알베도를 보여 단면형과 양면형 PV 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는데 특히 양면형 PV 에 더 큰 영향을

[7] http://www.firstsolar.com/ 8 http://www.solar-frontier.com/
[8] http://www.solar-frontier.com/

미친다. 눈은 겨울 폭풍과 함께 새로 내리면서 공기 중의 미립자로 인한 오염을 가리기 때문에 다른 흰색의 바탕보다 더 우수할 수 있다.

적설의 깊이 (일반적으로 누적)와 눈의 결정구조 (온도와 시간에 따라 변화) 모두는 반사율에 기여하는데, 반사율은 반사된 태양 복사가 어느 정도 어레이의 전면과 후면을 조사하는지에 영향을 미친다. 양면형 모듈의 이득은 후면 조사에 의한 것이다. 면내 일조량은 경사각도에 강한 의존성을 보여주며, 예를 들어 그림 50 과 같이 보통의 경사각도에서는 상당히 낮다

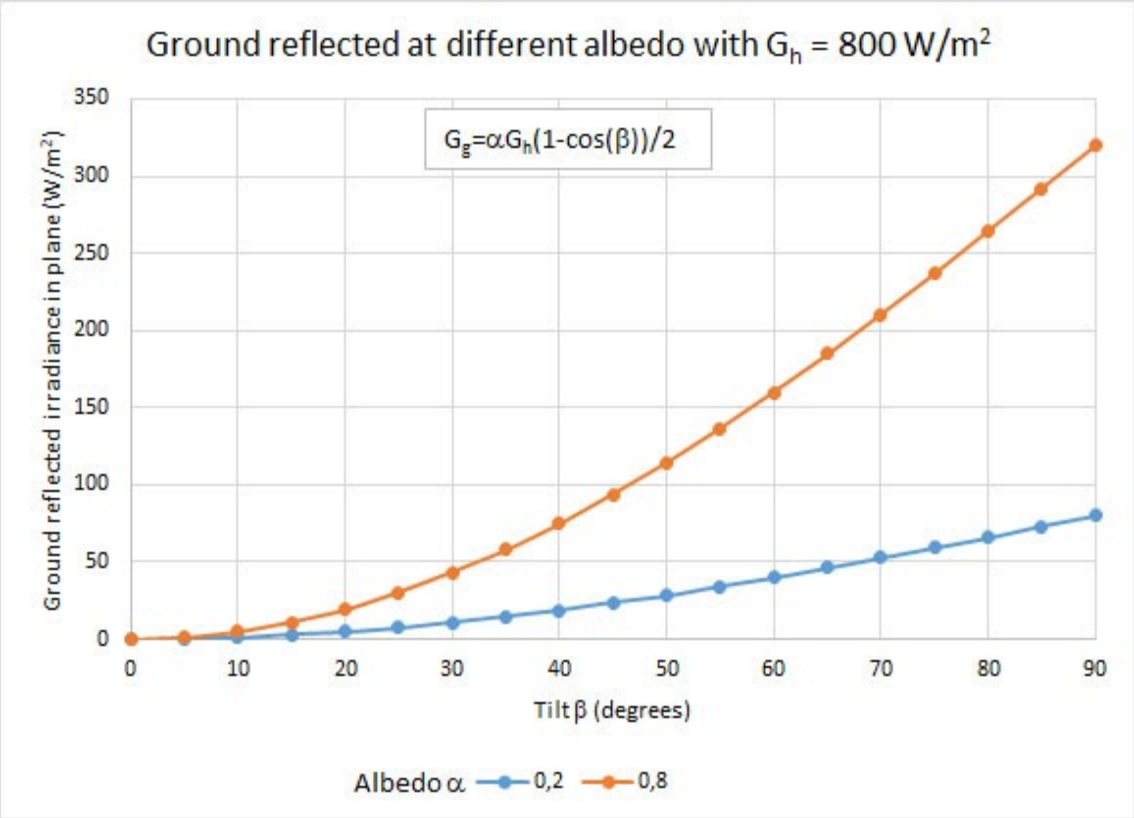


그림 50: Gg= αGh(1-cos(β))/2 공식을 사용하여 800 W/m² 의 수평면 조사강도(Gh)에서 모듈 경사각도(β)와 다른 알베도(α)의 함수로 계산된 지면 반사 조사강도.

7.3 눈의 세계적 분포

세계 여러 지역의 적설과 PV 출력의 상관관계를 파악하기 위해 관심 지역별로 적설이 있는 날의 수와 매일의 눈 깊이를 결정할 수 있다. 적설량 지도는 일간 및 연간 평균 통계와 함께 다양한 기간 동안 세계의 다양한 기상기관에 의해 만들어 진다.

북위 60 도 이하의 유럽에서는 피레네 산맥, 스위스의 알프스 산맥, 동유럽의 카르파티아 산맥과 같은 산악 지역이 연간 최대 160 일 동안 눈에 덮여 있다. 대조적으로, 영국, 프랑스 및 스페인은 일년 내내 눈이 내리지 않는다.

북유럽 국가인 노르웨이, 스웨덴, 핀란드에서는 북위 60 도 이상에서 연간 강설 일수가 약 60 일에서 200 일 이상까지 다양하다. 특히 스웨덴은 남에서 북으로 뚜렷한 분포를 보이고 있다. 겨울 동안 매일 눈 깊이 (적설 > 1 cm)를 측정한 수치는 스웨덴 기상수문연구소(SMHI) 웹사이트 [9]에서 확인할 수 있는데, 위도에 따라 평균 최대 눈 깊이가 0.4~1.3 m 이다.

세계기상기구(WMO)에 따르면 1961~1990 년 동안 스웨덴의 연평균 강설 일수는 남쪽이 25 일이고 북쪽 산악에서는 225 일 이상으로 다양했는데, 이는 길이가 1,574 km 인 작은 나라에서 9 배나 차이가 나는 것이다. 스웨덴과 인접한 노르웨이의 강설 일수는 일반적으로 더 많다. 이러한 차이는 산악 지역이 더 광범위하기 때문으로 고도는 연평균 기온 범위를 낮추고 대서양에서 유입되는 저기압에 따라 강수량을 더 키운다. 스웨덴 내와 북유럽 국가 간의 강설 일수 차이는 PV 시스템의 눈 손실을 수량화하는 것은 모든 적설 완화 전략의 경제적 계산과 마찬가지로 지역에 따라 달라져야 함을 시사한다.

하지만 스칸디나비아에서 PV 성능에 기여하는 요소로 간과할 수 없는 또 다른 추이가 나타났는데 바로 지구 기후변화이다. 스웨덴과 노르웨이에서 모두 최근 수십 년간 적설 일수가 줄어들었는데 [10],[11], 이 추세는 특히 스웨덴의 남반부에서 두드러진다. 겨울마다 눈이 오는 일수의 상대적인 변동은 북쪽보다 남쪽에서 더 크다. 이러한 변화는 스웨덴 남부의 많은 지역이 며칠 동안 눈이 덮이지 않는 이상한 상황을 경험했던 2019~2020 년의 따뜻한 겨울에 특히 두드러졌다. 강설 일수가 적어지는 추세는 기후가 따뜻해지면서 눈 손실이 더 줄어들 것임을 시사하지만, 전통적으로 눈이 더 많이 내린 지역에서는 눈이 양면형 PV 의 성능에 기여하는 요소로서 과다 평가될 수도 있음을 시사한다.

[9] https://www.smhi.se/

[10] SMHI. Klimatindikator – antal dagar med snötäcke. Updated 3 July 2019. Available: https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-ochnu/klimatindikatorer/klimatindikator-antal-dagar-med-snotacke-1.91081. [Last accessed 20-Apr-2020].

[11] MOSJ. Environmental monitoring of Svalbard and Jan Mayen. Duration of snow cover on land. Available: http://www.mosj.no/en/climate/land/duration-snow-cover.html. [Last accessed 20-Apr-2020].

7.4 눈 연구를 위한 중점 지역

겨울에 지속적으로 눈이 내리는 지역에서 태양광 보급을 촉진하기 위해서는 그림 51 과 같이 4 개의 주요 지역에 대한 연구가 필요하다.

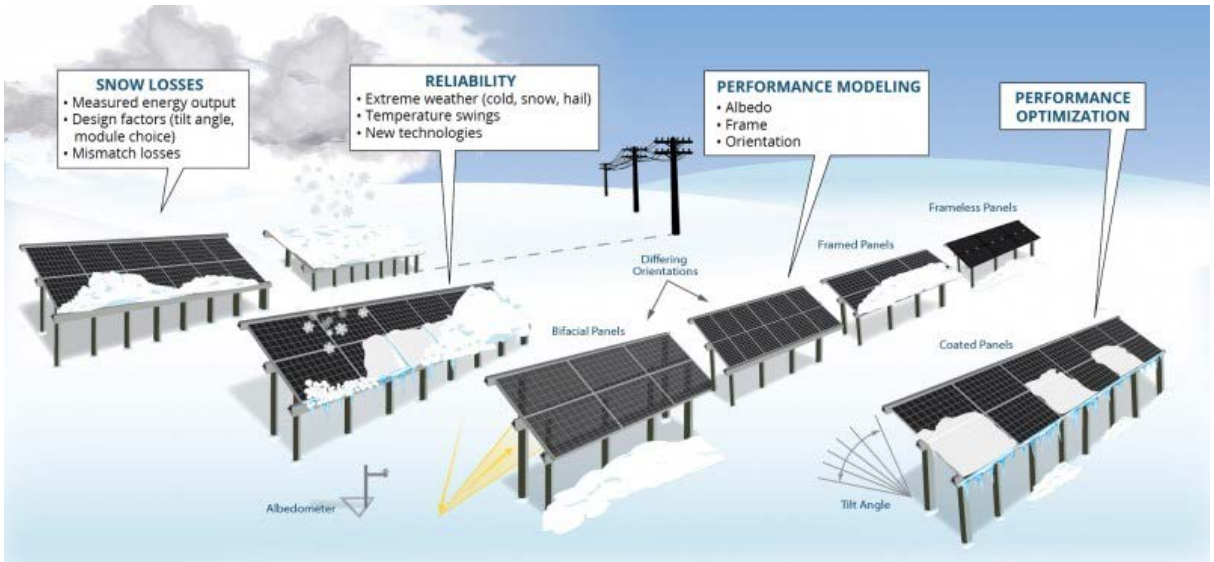


그림 51: 눈과 관련된 연구 과제. 눈과 관련된 운영 문제에는 에너지 손실, 신뢰성, 성능 모델링과 성능 최적화 [12]가 포함된다.

1. *눈 손실 메트릭스*: 눈으로 인한 월간 및 연간 에너지 손실 추정치는 상대적으로 작은 데이터 세트를 기반으로 하며 완화 전략을 개발하는 데 필요한 메타데이터가 부족하다. 눈 손실을 정량화 하기 위해서는 지역과 전세계적 차원뿐만 아니라 이러한 손실을 기술 및 설계의 선정과 연관시키기 위한 공동의 노력이 필요하다.
2. *신뢰성*: PV 어레이에 눈과 얼음이 붙게 되면 열기계적 부하 스트레스를 생성하고, 이것이 극심한 겨울 폭풍과 동결/융해(freeze/thaw) 사이클에 의해 악화되면서 태양전지를 균열시키고 모듈 프레임을 틀어지게 하고 코팅을 손상시켜 성능이 떨어지면서 모듈 불량으로 이어진다. 특정 모듈 및 시스템 설계와 관련된 열기계적 부하와 신뢰성 문제에 대한 데이터가 필요하다.
3. *예측 모델링*: 모듈의 눈 음영은 상당한 에너지 손실을 발생시키지만 더 자세한 성능 모델이 없으면 손실을 정량화하기 어렵고 거의 예측할 수 없기 때문에 개발자, 투자자 및 자산 소유자에게 정확한 균등화 발전단가(LCOE) 계산과 사전 자원 계획을 어렵게 만든다. 1~2주 전에 예보를 할 수 있지만, 사전에 강설량을 미리 예측하려는 시도는 오차율이 높다. 모듈 아키텍처와 같은 눈 제거 변수를 고려한 보다 정확한 모델이 필요하다.
4. *설계 최적화*: 눈을 빨리 치우는 시스템을 설계하는 것은 큰 가치가 있다. PV 시스템의 설계는 눈 손실에 영향을 미칠 수 있으며, 눈이 많은 지역에서는 기술적 선택에 수반되는 에너지의 영향을 보다 잘 정량화할 필요가 있음을 보여준다. 특정 설계의 에너지 측면의 이점(즉, 눈 치우기 능력)을 정량화할 수 있는 시범 프로젝트가 필요하다.

[12] https://energy.sandia.gov/Snow

5. *O&M 모범사례*: 북위도에서 주택용, 상업용 및 산업용 태양광의 O&M을 다루는 보고서 IEA-PVPS T13-25:2022 "Guidelines for Operation and Maintenance of Photovoltaic Power Plants in Different Climates"을 참조.

7.5 눈 손실 메트릭스

7.5.1 눈 측정 방법

다른 형태의 오염처럼 PV 모듈의 표면에 붙은 눈은 셀에 도달하는 태양 조사강도를 감소시키거나 때에 따라서는 제거시키며, 균일성에 따라서 불일치 문제를 발생시키고 바이패스 다이오드를 통한 전기의 경로를 바꾸게 된다. 그러나 다른 형태의 오염과 달리, 깊이 쌓인 눈과 얼음은 모듈에 정적 및 동적 열기계적 스트레스를 가하고 신뢰성 문제를 야기한다. 따라서 시스템 크기 조정, 산출량 예측 및 사용 수명 예측뿐만 아니라 LCOE 계산을 위해서는 눈의 축적과 어레이 성능에 미치는 영향을 정량화하는 것이 중요하다. 그러나 모듈 위의 적설 깊이를 측정하는 표준 방법은 존재하지 않으며 실제 눈 부하 시험을 대표하는 IEC 인증 (IEC 61215)에도 눈 부하 추정 규격은 없다. 후자는 균일한 수평 부하에 기초한 것으로 대부분의 PV 시스템에는 이례적이다.

눈을 측정하는 것은 여러 가지 이유로 어렵다. 우선, 눈의 깊이는 정적이지 않다. 오히려, 보충이나 감소/압축을 통해 지속적으로 변하고 있다. 눈은 바람과 승화에 의해 어레이에서 제거될 수 있고, 또한 온도가 따뜻해지고 부분적으로 녹으면 압축될 수 있다. 눈의 밀도는 경과 시간 (시간이 지남에 따라 눈이 압축되는 경향이 있음)과 눈의 결정구조를 나타내고, 이 둘은 모두 다른 슬라이딩 계수와 투과율 계수를 가지고 있음에도 불구하고 기존 모델은 눈의 밀도를 고려하지 않는다. 끝으로, PV 어레이 전체에서 눈 흘러내림이 서로 다른 속도로 발생하면서 모듈과 어레이 레벨 모두에서 눈 깊이가 불균일하게 되는데, 이것이 또한 그림 52 와 같이 측정 불확도를 증가시킨다. 눈 모델은 이러한 불균일한 분포를 고려하지 않고, 균일한 축적을 가정하는 적설량계 또는 가열식 우량계의 데이터에 의존한다.

그림 52: PV 어레이에서 눈이 불균일하게 흘러내리면 적설 깊이가 매우 도전적인 성능 지표가 된다.

PV 패널에서 눈의 깊이를 추정하기 위한 전통적인 방법으로 GHCN(Global Historical Climatology Network)의 기상 관측소 데이터를 사용하는 것이 포함되는데, GHCN 은 공통적인 품질 보증 규격을 따르는 전세계 지표면 관측소의 일일 기후 데이터 베이스를 지원한다. 또는 현장에 설치된 측정용 스틱에 의존할 수 있는데, 이 접근방식은 사람이나 카메라에 의한 능동적인 모니터링을 필요로 하며 표류하는 눈의 영향을 받아 측정 불확도를 초래할 수 있다. 전도 버킷형(tipping-bucket) 가열식 강우량계는 내리는 눈을 바로 포착하기 때문에 더 정확하다. 그러나 이 방식은 눈을 액체로 측정하기 때문에 실제 깊이에 대한 정보는 제공하지 않고 내린 수분의 양만 제공한다. 게다가 이 방법들은 모두 PV 어레이의 경사각도가 아닌 수평면에서 눈을 측정한다.

새로운 접근법으로 초음파와 레이저 시스템이라는 두 가지 물리적 원리를 가진 전자식 눈 깊이 센서의 사용이 포함된다. 현재 초음파 센서는 훨씬 더 일반적이다. 표적 위 센서의 빔 폭과 높이에 따라 달라지는 측정 콘(cone)은 신형 레이저 센서보다 폭이 넓고 ±10 mm 정도의 깊이 정확도를 가지고 있다. 초음파 센서는 일반적으로 50 kHz 에서 작동하지만 공기 중 음속이 온도에 따라 크게 변하기 때문에 변동을 보상하기 위해 주위 온도 측정이 필요하다. 이에 비해 시장에 비교적 생소한 레이저 눈 센서는 ±5 mm 안팎의 정확도로 눈 깊이를 측정하지만 측정 포인트 크기가 작아 눈 표면이 고르지 않을 경우 정확한 눈 깊이 측정에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 일부 제조업체는 다중 포인트 측정을 도입하고 있다. 그러나 레이저 기반 센서의 남은 단점은 효율적인 작동과 긴 수명을 보장하기 위해 레이저 다이오드를 가열하기 위한 전원의 필요성이다. 이러한 전력 요구사항은 원격 지역에서 레이저 센서의 독립적인 작동을 더욱 어렵게 만들 수 있다. 그렇지 않으면 레이저 기반 센서와 초음파 센서 모두 대부분 유지보수가 필요하지 않다. 제조업체 목록은 표 10 에 제시되어 있다.

표 10: 눈 깊이 측정에 사용할 수 있는 여러 제품의 부분 목록. 이 보고서의 모든 장비 가격은 근사치이다. 정확한 비용은 제조업체에 문의해야 한다.

Snow Sensors					
제조업체	Campbell Scientific	Campbell Scientific	Lufft	Judd LLC	Sommer Messtechnik
모델명	SR50AT	SDMS40-L	SHM 31	UDS	USH-9
방법	Ultrasonic	Optical	Optical	Ultrasonic	Ultrasonic
빔 폭	30 degree	Multi-point	Single point	22 degrees	12 degrees
전원 공급	9 to 18 VDC	12 to 15 VDC	12 to 24 VDC	12 to 24 VDC	9 to 27 VDC
최대 전력소비	4.5 W	30 W	18 W	0.6 W	1 W
출력 옵션	SDI-12, RS-485, RS-232	SDI-12, RS-485, RS-232	SDI-12, RS-485, RS-232	RS-232	SDI-12, RS-485, RS-232
눈 깊이 정확도	± 10 mm	± 3 mm	± 5 mm	± 10 mm	± 10 mm
근사 비용: Euro / USD	€ 1386 / $ 1574	€ 2358 / $ 2678	€ 2749 / $ 3121	€ 622 / $ 704	€ 1725 / $ 1959

PV 시스템의 적설 부하에 특정한 몇 가지 방법이 개발되고 있다. 경사진 어레이에서 눈의 양을 계산하기 위해 다음과 같은 몇 가지 기법을 사용할 수 있다:

1) PV 시스템의 경사각도로 설치된 모듈에 부착되지만 개방 회로 상태에 있는 측정 스틱.
2) 깊이를 모델링해야 하지만 기계적 (중량) 부하의 함수로 모듈 변위를 측정하는 변위 센서. 센서는 모듈 후면에 부착할 수 있지만, 하단 가장자리의 눈 축적을 포함하여 중량 하중의 불균일성에 대한 데이터를 포획할 수 있도록 균일하게 분포되어야 한다.
3) 어레이 끝에 일반적으로 촬영되는 스테레오 디지털 이미지이다. 그러나 이 기술은 이미지를 저장하기 위해 카메라와 데이터 로거를 설치해야 한다.

이 외에 눈으로 덮인 시스템의 백분율을 측정할 수 있는 새로운 방법이 최근에 개발되었다 (따라서 눈과 관련된 출력 손실을 모델링하고 예측할 수 있다). 이 방법은 5 분 간격으로 촬영된 시계열 이미지를 기반으로 하며, 그 후 눈의 영역과 투명 영역으로 2 진화되어 서로 상대적으로 정량화될 수 있다 [160]. 아직도 다듬어지고 있는 이 기술은 아직 눈의 깊이를 반영하지 못하고 있다.

7.5.2 눈 손실 예측 모델링

눈 음영 손실은 눈이 없을 때의 예상 시스템 성능과 눈으로 완전히 또는 부분적으로 덮여 있는 시스템의 실제 성능을 비교하여 계산할 수 있지만 이러한 손실은 과거의 것이며 예측할 수 없다. 또한, 이 방법은 가열한 어레이면 일사량계 대비하여 시간 경과에 따라 눈에 덮인 모듈의 백분율과 그 비율의 변화를 결정하기 위해 시간 스탬프가 찍힌 디지털 이미지의 분석을 필요로 한다. PV 의 급속한 보급을 고려할 때 겨울 기후에서 눈의 영향을 예측하거나

모델링하는 것은 정확한 균등화 발전단가(LCOE) 계산과 계통선에 공급되는 유틸리티 규모 설비의 자원 계획에 필수적이다.

눈 음영에 기인한 에너지 손실은 북부 지역에 설치된 PV 의 LCOE 와 자원 가용성에 영향을 미치며, 이는 특히 겨울 폭풍이 전력선을 파괴할 때 문제가 될 수 있다.

눈이 많이 내리는 지역에 PV 를 설치하는 데 있어 핵심 과제는 계절 내 및 계절 간 고유한 강설의 변동성과 모듈에 눈이 붙는데 기여하는 많은 인자들을 고려하여 PV 시스템에 대한 정확한 연간 에너지 산출량을 예측하는 것이다. 눈으로 인한 PV 패널의 연간 에너지 손실을 추정하기 위한 여러 시도가 있었지만, 발표된 데이터는 제한된 수의 사이트들, 소규모 연구 규모 그리고 눈 손실의 원인이 되는 변수의 불완전한 설명에 그치고 있다. 게다가 이러한 모델 중 경사각도 이외의 시스템 설계 인자들을 고려하는 모델은 없는데, 하지만 설계상의 매개변수들은 시스템의 스노우 쉐딩 능력에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

현재까지 연간 에너지 생산량의 백분율로 눈 손실을 나타내는 몇 가지 눈 손실 모델이 개발되었다 [100], [161], [99]. 이들 모델은 경사각, 온도, 습도, 조사강도 등을 고려한 것으로 왁스 처리된 스키의 마찰 저항에 기초한 슬라이딩 계수를 포함한다. 이러한 모든 모델은 일차적인 눈 제거 메커니즘이 패널에서 눈이 미끄러지는 것이라고 가정한다. 또한, PVWatts [162]와 같이 단순한 스케일링 이상으로 눈 손실 모델링을 지원하는 주요 PV 모델링 소프트웨어 제품은 없다. 하지만 Ryberg 등 [163]은 Marion 등 [99]의 눈 모델을 미국 NREL 의 System Advisor Model(SAM)에 통합시켰다.

모듈 표면에서 눈이 흘러내리는 메커니즘은 녹는 것과 미끄러지는 것 두 가지가 있는데, 두 메커니즘은 상호 연관되어 있고 바람은 추가적인 인자이다. 용융은 일반적으로 눈의 층이 얇고 공기 온도가 0°C 에 가깝거나 그 이상으로 상승하여 빠르게 녹을 수 있을 때 발생하는데, 이 과정은 높은 태양 조사강도에 의해 가속화된다. 스노우 슬라이딩은 일반적으로 마찰력 감소에 의해 유발되며 모듈 표면에 녹은 눈의 얇은 층이 형성되거나 눈의 무게가 표면 저항을 극복하기에 충분할 때 발생하여 눈과 기판 계면에서 분리가 일어나게 된다. 어레이에 부분 음영이 있으면 스노우 쉐딩이 균일하지 않지만 슬라이딩은 그 이후에 비교적 빠르게 발생할 수 있다.

PV 모듈에 대한 눈의 마찰 계수가 아직 제안되지 않았지만, 눈의 슬라이딩 힘은 다음 방정식에 담겨있다 [99]:

$$FS = \mu * m * g * \cos(\beta) \tag{17}$$

여기서

- 중력에 기인하는 슬라이딩 힘 Fs 는 눈의 정적 마찰 계수(μ), 눈의 질량(m), 중력 가속도(g) 및 경사각 cos(β)에 의해 결정된다
- μ= 눈의 정적 마찰 계수
- m=눈의 질량
- g=중력 가속도
- β=경사각도

또한 약간의 눈 녹음이 발생하기에 충분한 조사강도가 있을 경우 경사각도에 따라 영하의 주위 온도에서도 슬라이딩이 발생할 수 있다. 경사각도가 높을수록 눈이 더 일찍 흘러내리고 더 빠른 속도로 완전히 흘러내릴 가능성이 있다. 폭설이 내리는 사이트의 경우 슬라이딩을 유도하기 위해 60° 이상의 각도를 권장한다. 그러나 이러한 권장사항을 확인하려면 연평균 에너지 산출량을 포함한 더 많은 데이터가 필요하다. 예를 들어 스웨덴 북부 (위도 65°N)에서 수행된 연구에 따르면 모듈 프레임에 물리적 장애가 없을 때 모듈 기울기가 눈을 제거하는데 최소한의 기여를 하는 것으로 나타났다. Granlund 등의 이 연구에서 프레임이 없는 10 개의 양면형 모듈을 경사각 0°에서 90°까지 5° 씩 증가시켜 설치하였다. 0°와 90° 모듈을 제외하고는 모두 비슷한 속도로 눈이 제거되는 것으로 확인되었다. 연구자들은 25°에서 80°까지 설치된 모듈 간의 제설 속도에 큰 차이가 없기 때문에 경사각도가 북부 기후에서 시스템 설계의 주요 결정 요인이 되어서는 안 된다고 결론을 내렸다. 경사각보다는 온도에 의존하는 녹은 층이 일단 형성되면 저항력이 모든 경사각도에서 동일하다고 가정할 수 있다. 그러나 Granlund 연구는 단일 모듈을 기반으로 하며 모듈 사이의 간격, 프레임의 존재 또는 클립 형상과 같은 PV 어레이 특유의 물리적 요인을 고려하지 않고 있다. 본 연구는 또한 모듈 표면의 마찰력을 극복하고 눈 제거에 기여할 수 있는 충분한 슬라이딩 힘을 만들어 낼 수 있는 눈의 깊이, 밀도 또는 동질성을 고려하지 않고 있다.

더 나은 추정 도구를 제공하기 위해, 눈 손실 모델링에 대한 몇 가지 혁신적인 접근법이 최근 문헌에 등장하였다. Universite de Quebec 의 한 팀은 4 년간의 시간별 기상 데이터와 여러 머신러닝 알고리즘으로 개발된 일간 눈 손실 예측 모델을 제안하였다. 모델은 산출량, 출력 손실 (눈, 미스매치, DC 케이블 손실, 최대 출력점 추적과 낮은 조사강도를 포함한 모든 출처로부터의), 눈 손실 (눈으로 인한 출력 손실 비율)의 세 부분으로 나뉜다. 이전 모델과 마찬가지로, 이 모델은 하나 이상의 사이트에 대해 아직 검증되지 않았다 [165]. 퀘벡 대학의 두 번째 팀은 일조량 투과에 관한 Bouguer-Lambert Law 및 PV 모듈 관련 전기적 특성에 따라 모듈이 균일하게 눈으로 덮여 있을 때 모듈을 통해 들어오는 조사강도의 양을 추정하는 대체 모델을 개발했지만 이 모델 역시 검증되지 않았다 [166].

다른 모델에서는 표면에서 눈이 녹는 것을 예측하려고 시도했지만 수평의 표면만 고려하였다 [167] [168]; 눈 녹음에 대한 보다 최근의 모델은 PV 시스템 특유의 작동 매개변수뿐 아니라 열과 물질 전달 방정식을 통합하고 있다 [169]. 이 모델은 패널 경사 방향으로 눈이 표면을 타고 흘러내리는 것과 함께 조사강도와 외기 온도가 충분히 높은 경우 눈 녹음이 모듈 표면 (외부 가열의 결과)과 상단 표면 모두에서 발생할 수 있다고 가정한다. 모델에 대한 입력으로 눈 슬라이딩을 촉진시키는데 필요한 측정된 에너지, 경사각도, 단위 면적당 질량으로 측정된 적설 및 주변 온도가 포함된다. 그러나 모델링되지 않은 매개변수에는 패널의 오염, 표면 토폴로지, 프레임의 존재 유무 및 슬라이딩에 대한 물리적 장벽을 만드는 하단 프레임을 따라 얼음이 쌓이는 것이 포함된다.

7.6 눈이 많이 내리는 기후에 대한 설계 최적화

예비 연구에 의하면 기후별 특징을 고려한 기술과 설계의 선택이 측정 가능한 효율 향상으로 이어질 수 있음을 시사한다 [159]. 눈 흘러내림의 비율을 증가시키거나 눈 음영의 영향을 줄이는 선택은 다음 범주에 속한다:

- 모듈 아키텍처(예: 프레임 대 프레임리스, 셀 스트링 등)
- 모듈 기술(태양전지 크기와 설계, 양면형 대 단면형)

- 시스템 설계(모듈 방향, 지상 높이, 경사각도, 클립 설계와 배치)

아래에 기술된 선택사항은 상업용과 유틸리티 규모의 시설과 가장 관련성이 높은 것이다; 주택용 루프탑 PV 도 고려되지만 설계 옵션이 여기서는 더 제한적이기 때문에 깊이 논의되지는 않는다.

7.6.1 모듈 아키텍처

최근 몇 년간 PV 모듈의 효율 향상에 특히 집중하면서 모듈 기술과 설계에 대한 관심이 급증하고 있다. 이 절에서는 눈이 많이 내리는 기후에서 다양한 모듈 설계의 성능에 대해 기술하고 더 많은 연구가 필요한 영역을 제시하고자 한다.

1. *프레임 설계*

모듈 프레임은 저항을 만들면서 댐과 같이 작용하는데, 적설 깊이, 외기 온도와 조사강도에 따라 눈 슬라이딩의 모멘텀을 느리게 만들고 눈이 모듈의 아래 부분에 압축되게 하며, 나아가서는 슬라이딩 프로세스를 방해한다 [170]. 모듈 방향, 형상 인자, 눈 깊이, 외기 온도와 조사강도가 기여 인자들이지만, 낮은 프로파일의 프레임 형상조차도 눈의 슬라이딩을 방해한다 [171]. 몇 밀리미터라도 모듈 유리 위로 돌출된 프레임의 불연속성은 눈과 얼음을 위한 발판을 제공할 수 있다. 프레임 길이에 비해 프레임 하단 위에 있는 눈 무게가 무거울수록 하단 가장자리를 따라 쌓인 눈이 프레임 위의 눈의 무게를 지탱할 수 있는 가능성이 줄어든다.

명확하지 않은 것은 특정 프레임 형상 (예: 경사진 모서리) 또는 프레임의 색상에 기인하는 정량 가능한 차이가 있는지 여부로 여기에 대한 연구가 필요하다. 분명한 것은 프레임 없는 모듈이 적절한 기후 조건에서는 프레임 없는 모듈보다 더 빨리 눈을 흘러내리게 할 수 있다는 것이다. 최근의 한 연구에서는 12 월에 프레임 없는 모듈의 어레이가 프레임 있는 모듈보다 13% 더 많은 에너지를 생산한 것으로 나타났다. 눈이 흘러내리는 속도에 영향을 미치는 외기 온도의 역할을 보다 잘 이해하기 위한 연구가 진행 중인데, 기온이 떨어지면서 부피가 줄어드는 두 어레이 사이의 차이를 낮은 온도에서는 표면 점착력이 더 높기 때문으로 보고 있다. 또 다른 연구는 프레임 없는 패널에서 눈이 빠르게 흘러내릴 때 눈이 지면에 마운드를 형성할 것이라는 것을 보여주었다. 이 마운드들은 결국 모듈의 하단 열을 가로막는 더 큰 마운드들을 만들게 된다. 대조적으로, 인접한 프레임 있는 모듈 아래의 마운드는 더 작은데, 이는 모듈의 하단 가장자리에 일부 눈이 남아 있을 뿐만 아니라 지면에 도달하기 전에 바람이나 용융을 통해 일정량이 제거되기 때문이다 [170].

그림 53: 프레임 있는 모듈과 없는 모듈이 나란히 배치된 PV 어레이는 모듈 프레임이 스노우 쉐딩에 미치는 영향을 보여준다. 12 월에 프레임 없는 모듈(우)은 인접한 프레임 모듈보다 13% 더 많은 에너지를 생산하였다. 프레임의 유무를 제외하고 모듈은 사실상 동일하였다 [170].

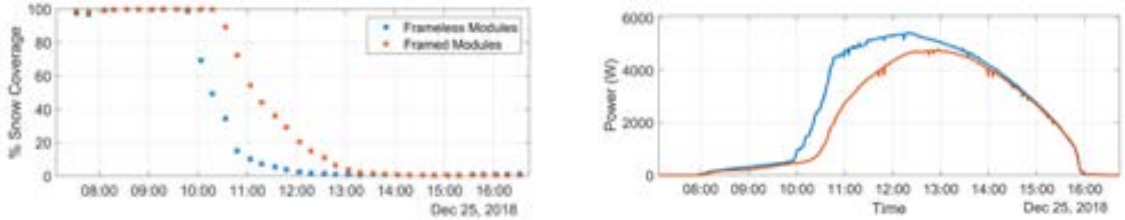


그림 54: 인접한 프레임 있는 모듈과 없는 모듈에 대한 스노우 쉐딩과 에너지 산출량의 차이. 왼쪽의 그래프에서 볼 수 있듯이, 프레임 없는 모듈은 프레임 있는 모듈에 비해 거의 한 시간 전에 스노우 쉐딩이 시작된다. 이 차이는 오른쪽의 출력 산출량 그래프에 나타나 있다 [170].

다른 인자들도 고려되어야 한다. 예를 들면, 지면에서 눈의 축적을 피하기 위해 더 높은 랙킹이 필요한 경우 설치 비용이 더 소요될 수 있다. 또한, 프레임 없는 모듈은 설치 중에 더 섬세한 취급이 필요한데, 이는 특히 유틸리티 규모로 설치할 경우 비용을 증가시킬 수 있다. 더욱이 프레임 없는 모듈은 더 큰 눈 부하의 무게에 저항하기 어렵고 장기적으로 수분 침투에 더 취약할 수 있어 신뢰성 문제가 있을 수 있다. 프레임 있는 모듈은 고유의 신뢰성 문제를 가지고 있다: 프레임 아래에서 물이 얼어 프레임과 모듈 유리에 팽창 압력을 가할 수 있다. 폭설 부하 시, 모듈의 하단 가장자리에 가해지는 하중으로 인해 프레임이 모듈로부터 부러질 수 있다 [172]. 공간 분포를 포함하여 추위와 눈으로 인한 모듈의 열기계적 스트레스에 대해 더 많이 이해함에 따라 프레임 설계를 개선할 수 있는 기회가 있을 것이다. 가능성은 소재 교체, 예를 들어 알루미늄 대신 복합 소재 또는 안정성을 높일 수 있는 후면 바의 유형 등을 포함한다.

2. 형상 인자

더 큰 사이즈의 모듈은 소형 모듈보다 프레임 대비 유리 비율이 크기 때문에 슬라이딩 저항이 적지만, 면적이 커서 스트레스에 취약할 수 있다. 이 점은 다양한 열기계적 부하 조건에서 조사되어야 한다.

3. 커버 유리 텍스처와 코팅

텍스처 커버 유리를 사용하면 입사각 손실을 개선할 수 있지만 매끄러운 유리는 표면 거칠기를 줄임으로써 눈이 흘러내리는 비율을 증가시킬 가능성이 있는 것으로 알려져 있는데, 여기에 대해서는 추가 조사가 필요하다. 스노우 포빅 표면 필름 또는 코팅의 적용은 눈 제거 성능을 향상시킬 수 있는 또 다른 기술이 될 수 있지만, 이러한 코팅은 높은 광학 투과율과 미끄러지는 눈으로부터의 마찰을 견딜 수 있는 충분한 내구성을 가져야 할 것이다.

7.6.2 태양전지 혁신

고효율 모듈과 저비용 제품에 대한 욕구로 태양광산업은 급격한 기술 변화를 겪고 있다. 일어나고 있는 혁신은 운영 환경 자체가 아니라 비용 절감이 동기부여 요인이지만, 많은 변화는 눈이 자주 내리는 북부 기후와 더 큰 관련이 있다. 이 절에서는 이런 변화를 간략히 기술한다.

셀 크기

실리콘 웨이퍼 기반 PV 기술은 2019 년 전체 생산량의 약 95%를 차지하였다. 단결정실리콘 태양전지는 모듈의 최대 정격 출력을 높이고 생산 효율을 높이기 위해 웨이퍼 크기가 점점 커지는 등 성장기를 맞고 있다. 10 여년 전에는 125 mm x 125 mm 의 셀 크기가 주류를 이루었고, 2010 년에는 소위 M1 셀 (156 mm x 156 mm)이 인기를 끌었고, 몇 년 뒤에 M2 웨이퍼 (156.75 mm x 156.75 mm)가 그 뒤를 이었다; 현재는 더 큰 사이즈 (157 mm x 157 mm) 와 M6 셀 (166 mm x 166 mm)이 출현하고 있다.

그러나 셀 크기가 증가함에 따라 저항 손실도 증가하면서 출력 산출량이 감소한다. 제조업체들은 셀에서 모듈로의 (cell-to-module: CTM) 효율 손실을 줄이기 위해 half-cut 셀로 이동하였다. 이러한 기술 추이의 영향과 함께 더 얇은 웨이퍼로의 전환은 저온과 적설 부하의 결합 스트레스에 대한 웨이퍼의 민감도에 대해 의문을 제기하였다. 예를 들어, 연구에 따르면 셀 취약성이 온도에 반비례하지만, 온도가 영하로 떨어질 때 특히 모듈에 눈 부하가 동반되면 셀 균열이 발생할 가능성이 더 높아진다는 것이다 [173]. 그러나 이 연구는 새로운 기술과 더 넓은 범위의 열-기계적 부하 시나리오로 확장되어야 한다.

하프컷 및 슁글 셀

최근 2 년간 태양광 업계는 기존 4 개의 스트링 대신에 더 높은 전압과 음영에 잘 견디는 특징을 가진 6 개의 스트링으로 된 하프컷 (half-cut) 셀에 큰 관심을 보이고 있다. 한편, 하프컷 셀로 만든 새로운 모듈은 눈이 많이 내리는 기후에서 최적의 선택이 될 수 있는데, 세로 방향 설치에서 아래 반에 음영이 생길 때 기존 모듈보다 성능이 더 좋다. 다른 한편으로, 부분적으로 절단된 하프컷 셀은 폭설 부하 및/또는 극심한 저온 하에서 균열에 취약할 수 있다. 하프컷 셀의 시장 침투가 예상되는 점을 감안할 때, 북위도에 설치된 시스템의 현장 데이터가 요구된다.

슁글형 (shingled) 태양광 모듈은 실리콘 셀을 여러 부분 (일반적으로 3~4 개)으로 잘라 지붕의 슁글처럼 겹쳐 놓고 전기 전도성 페이스트로 상호연결한 것이다. 슁글 방식은 몇 가지 장점이 있는 것으로 간주된다: 절단된 셀이 부분적으로 겹쳐져 있어 면적 활용을 개선할 수 있다; 슁글 방식은 전도성 접착 페이스트로 연결되어 버스바가 필요하지 않고

음영 손실이 감소한다; 싱글형 모듈은 또한 잘 알려진 불량 포인트인 납땜 리본이 없다; 그리고 병렬로 배선할 수 있어 설치 방향에 따라 음영에 잘 견디게 된다. 그러나, 좀 더 철저히 조사되어야 하는 것은 겨울에 열기계적 스트레스를 받을 때 특히 버스바의 불량 문제는 없으나 셀들이 서로에 의해 지지되는 만큼 그 성능이 어떻게 될 것인가 하는 점이다.

양면형 대 단면형

양면형 PV 시장의 급속한 성장은 모듈 가격이 상대적으로 저렴하며 이미 인식되고 있는 장점으로 설명될 수 있다. 이러한 장점은 북부 지역에서 보다 확연해 지는데, 다설 지역이라 눈이 몇 달 동안 지면에 지속되어 알베도가 높은 작동 환경을 만들기 때문이다. 양면형 모듈의 장점 중 하나는 후면이 눈에 덮이지 않아 전면이 눈에 가려져도 발전이 가능하다는 점이다. 장착 구조물에 의한 음영이 문제가 될 수 있지만, 대부분의 랙킹 회사는 현재 양면형 시스템 전용의 랙킹을 설계하고 있다.

초기 연구는 겨울에 양면형 모듈의 이득이 상당할 수 있으며 양면형 시스템 설계에 대한 새로운 접근 방식이 타당할 수 있음을 보여주었다. 예를 들어, 알래스카의 동-서 방향 수직 설치 양면형 어레이에 대한 현장 연구에서는 이 방식이 전통적인 설계보다 5~20% 더 많은 에너지를 생산하였으며 전기 부하와 잘 일치하는 하루에 두 개의 에너지 피크를 생성하고 눈 음영이 거의 없음을 입증하였다 [174].

Vermont 주의 양축 트랙커에서 양면형 성능에 대한 두 번째 연구도 인상적인 결과를 얻었다. 이 경우, 일년 동안에 양면형 모듈 스트링이 인접한 단면형 모듈 스트링보다 14% 더 좋은 성능을, 특히 그림 55 에서와 같이 겨울에 가장 높은 이득을 보였다. 이 실험의 결과는 어레이에 수직으로 조사강도를 최대화시킬 수 있는 양축 트랙커가 모듈 뒷쪽에도 넓은 광학적 포획 영역을 허용한다는 것을 시사한다. 이 연구는 양면형 모듈이 단면형 모듈보다 더 빠른 속도로 눈이 흘러내릴 것이라는 것을 보여주었는데, 이는 후면의 조사강도가 증가하면 모듈 온도가 증가하기 때문일 것으로 보인다 [159].

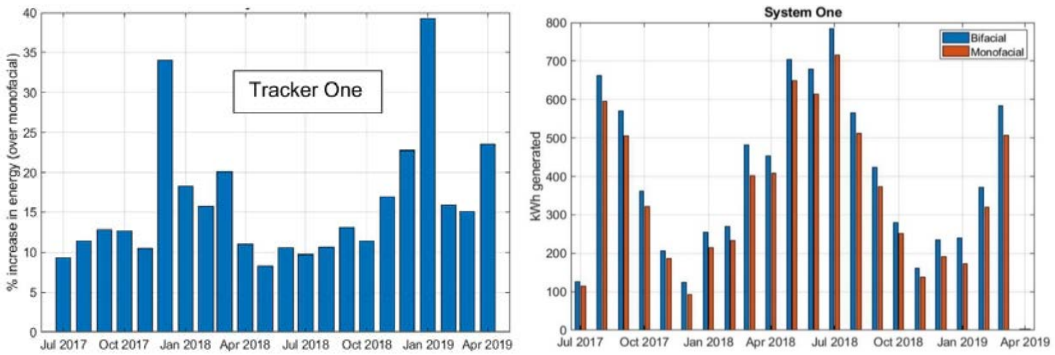


그림 55: 양축 트랙커 위에 단면형 모듈 스트링 바로 옆에 설치된 양면형 모듈 스트링은 단면형 모듈에 비해 연평균 14%의 에너지 이득을 보였다 [159].

7.6.3 시스템 설계

경사각도

경사각도는 대략 위도 (위도 기울기)와 상관관계를 보이는데, 극북의 유틸리티와 상업용 시설에서는 최대 45°의 고정 경사각도를 가진다. 경사각의 선택은 일반적으로 입사각과 어레이 행 간의 음영 계산에 기초한다. 예를 들어, 스웨덴에서는 어레이가 정남향이라고 가정할 때 위도 60N 에 대한 최적의 기울기는 40~45°이다. 현재까지 경사각이 눈 흘러내림에 미치는 영향에 대한 연구는 주목 받지 못하고 있는데, 이는 아직 잘 이해되지 않은 여러 변수를 반영하기 때문이다 [100]. 그러나 이 연구는 장애물이 없는 시스템의 경우 경사각도가 0 도에서 45 도로 증가함에 따라 연간 에너지 손실이 34%에서 5%로 크게 감소하였음을 보여주었다.

모듈 방향

모듈 방향은 눈 제거에 기여하는 것으로 생각되지만, 이 가정에는 보다 향상된 정량화가 필요하다. 예비 연구에 따르면 수평 프레임의 길이 대비 수직 유리의 길이는 프레임 가장자리 너머로 눈을 흘러내리게 하는 더 큰 슬라이딩 모멘텀을 허용한다. 이러한 이유로 가로형 (풍경화) 배열이 아닌 세로형 (초상화) 배열로 모듈을 장착하는 것이 눈 흘러내림에 도움이 될 것으로 생각될 수 있으나 모듈 스트링 작업과 바이패스 다이오드의 위치도 고려되어야 한다 [160].

그림 56: 동일한 경사각도지만 모듈 방향이 서로 다른 두 개의 인접 PV 시스템은 모듈 방향이 눈 흘러내림에 미치는 영향을 조사하기 위한 이상적인 실험 장치이다. 위에서 나타낸 바와 같이 온도 의존성과 바이패스 다이오드의 역할을 조사하기 위해 더 많은 연구가 필요하지만 모듈 방향은 눈 흘러내림 속도에 영향을 미칠 수 있다 [160].

모듈 클립

랙 위의 모듈 간 간격과 모듈 클립의 위치, 크기 및 프로파일 모두는 눈 제거에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 인접한 모듈 사이 몇 cm 의 공간에 쌓인 눈이 더 이상의 슬라이딩을 방해할 수 있는 물리적 장애물이 될 수 있다; 마찬가지로 클립은 세 개의 모듈 스트링 전부에 음영을 만들 수 있는 모듈 표면 위의 눈을 잡고 있는 스노우 댐으로 작용할 수 있다. 클립

효과의 예는 그림 57 에서 볼 수 있다. 모듈 프레임 및 기타 설계 특징이 눈 제거에 미치는 영향은 앞의 절에서 논의되었다.

그림 57: 모듈 클립. 이 사진은 모듈 클립이 모듈 표면에서 눈이 미끄러지는 것을 방지하는 물리적 장벽을 어떻게 만들 수 있는지 보여준다.

어레이 높이

어레이 높이는 눈 손실의 또 다른 중요한 요인이다. PV 어레이가 지면에 너무 가깝게 위치하고 그리고 어느 정도의 눈 녹음 없이 눈이 너무 빨리 또는 너무 자주 흘러내리면 눈이 지면에 쌓여서 PV 어레이를 집어삼킬 수 있는 더미를 형성하여 출력 산출량을 줄이고 기계적 부하에서 수분 침투에 이르기까지 신뢰성 문제를 야기할 수 있다. 어레이와 지면 사이에 최소 1 m 의 간격 (clearance)을 제공하면 눈이 어레이의 하단 가장자리에 닿지 않고 눈이 쌓일 수 있는 공간이 제공되지만, 높이는 국지적인 눈과 바람 조건도 고려해야 한다. 지붕 장착 모듈이나 심지어 극한의 눈 이벤트가 많은 지상 장착 시스템과 같이 간격이 부적절한 경우에는 눈이 모듈 프레임의 하단에 쌓이는데, 이는 피해야 한다 (그림 58 참조).

그럼에도 불구하고, 이 분야에서 더 높은 랙킹의 엔지니어링 및 설치 비용과 지면에서 쌓인 눈으로 인한 에너지 손실 간의 균형을 알아낼 수 있는 더 많은 연구가 필요하다.

지상 장착 시스템

겨울 4~6 개월에 걸쳐 눈이 쌓이고 깊이 2 m 이상으로 땅이 얼어붙는 북부 지역에서는 겨울 설치 비용과 복잡성 때문에 대부분의 PV 설치가 계절적 활동이다. 그럼에도 지형이 암석인지 영구 동토인지 모래와 점토의 혼합인지에 따라 추운 기후에서 어레이 랙킹을 위한 기초를 설치하는 것은 어려울 수 있다. 또한 걱정거리는 겨울에 땅이 얼어서 솟아오르는 현상 (frost heaves)을 일으키는 지하수위 (water table)의 높이인데, 따라서 상대적으로 깊게 말뚝을 박을 기둥이 필요하다. 만약 frost heaves 가 걱정된다면, 기초는 서리 레벨 아래로 확장되어야 한다; 그렇지 않으면, 계절적인 동결-융해 기간 동안 토양이 팽창하고 수축하면서 말뚝이 이동할 수 있다.

영구 동토층이 있는 사이트에서는 영구 동토층이 안정적이고 녹을 기미가 보이지 않는다는 가정하에 기초를 얼어붙은 토양에 직접 고정할 수 있다. 해빙된 토양층은 여름 동안 영구 동토층까지 팔 수 있다. 주변 공기에 노출되면, 깊이 30 cm 의 영구 동토층이 녹고 제거되면서 강철 플랫폼을 설치하고 발포성 단열재를 얹을 수 있는 구멍을 만들 수 있다. 그런 다음 굴착 부분이 채워지고 전체 구조물이 영구 동토층에 볼트로 고정이 된다 [3].

그림 58: PV 어레이의 높이가 충분하지 않으면 지면에 눈이 쌓여 더 이상의 눈 미끄러짐을 방해할 수 있다.

트랙킹 시스템

단일축과 양축 트랙커 모두는 눈 손실을 줄이기 위한 또 다른 접근방식이다. 눈 점착을 최소화하거나 눈이 흘러내리는 것을 가속화하기 위해 트랙커를 경사지게 하거나 집어넣을 수 있다. 그러나 트랙커는 모터와 제어장치를 필요로 하므로 이 두 가지 모두 특히 저온 작동 환경에서 복잡성과 신뢰성 문제를 추가시킨다. 또한 트랙커 움직임과 결합된 눈 부하가 특히 영하의 온도에서 태양전지에 스트레스를 가해 셀 균열을 초래할 수 있는지 여부는 알려지지 않았다 [175].

주택용 루프탑 PV

지붕의 나머지 부분과 대비할 때 주택용 루프탑 PV 에 대한 우려는 어레이의 위치에 따라 두 가지이다. 1) 위험이 제기될 수 있는 미니 아발란치를 만들면서 눈이 갑자기 흘러내릴 수 있으며, 2) 눈이 모듈에서 흘러내렸지만 지붕 기판에 부착되어 더 이상의 흘러내림을 막는 스노우 댐을 생성할 수 있다. 안전 문제를 완화하기 위해 일부 PV 회사는 지붕 가장자리를 따라 설치할 수 있는 스노우 가드 또는 물리적 장벽의 설치를 지지한다. 스웨덴에서는 PV 시스템에서 80 cm 떨어진 곳에 스노우 가드 설치를 권장한다 [176].

눈의 흘러내림을 유리하게 하는 다른 옵션은 지붕에 완전 혹은 반일체화된 프레임 없는 모듈과 루프탑 PV 시스템의 설치인데, 어레이의 프로파일을 낮추어 슬라이딩 저항을 줄일 수 있게 된다. 태양광 지붕 타일은 아직 주류가 아닌데, 혹독한 겨울 조건에서 장기적인 신뢰성이 확립되지 않았지만 또 다른 옵션이 될 수 있다.

파워 일렉트로닉스

추운 기후는 온도 사이클을 악화시키고 전자소자 내부에 응축을 발생시켜 성능의 흔들림 또는 단락을 초래할 수 있다. 자연 대류와 복사에 의해 냉각된 회로가 팬 냉각 소자보다 바람직한데, 팬은 저온에서 불량이 날 수 있고 원격 위치에서 구성 요소를 교체하기 어렵기 때문이다. 에폭시로 둘러싼 전자제품은 열팽창 계수의 차이가 과도한 응력을 유발하지 않도록 특정 온도 범위에서 사전 테스트해야 한다. 액정 디스플레이는 추운 환경에서 잘

작동하지 않을 수 있다. 인버터 또는 충전제어기는 근처 건물과 같이 건조한 보호 환경에 있는 것이 좋고, 가능하지 않은 경우에는 비바람을 막아주는 역할을 제공하는 PV 랙의 뒷면에 걸어야 한다. 단, 배터리는 부식성 증기 또는 수소 가스가 발생할 수 있으므로 별도로 보관해야 한다. 또한 인버터와 충전 컨트롤러의 크기도 적절하게 조정해야 한다. 결저질실리콘 모듈의 전압은 온도가 감소함에 따라 증가한다. 온도에 대한 전압 의존성은 암상태 포화 전류의 영향을 가장 강하게 받는데, 이는 결국 진성 캐리어 농도에 대한 온도 의존성을 보여준다. 개방전압이 상승하는 동안 밴드갭 확대로 인해 낮은 온도에서 단락전류가 약간 감소한다. 최대출력과 개방전압은 0.3~0.5% 향상되는 반면 단락 전류는 표준시험조건 25°C 이하에서 매 1 도 내려갈 때마다 약 0.04~0.06% 감소한다. 저온에서 성능에 미치는 전반적인 영향은 출력 증가와 약간의 충진율 개선이다. 예를 들어, 평균 온도 0°C 에서 작동하는 결정질실리콘 어레이는 동일한 태양 조사강도에 대해 25°C 에서 작동하는 어레이보다 약 10% 더 많은 전력을 생산한다 [4].

8 결론

이 보고서는 여전히 진화하고 있는 오염 분야의 추이를 요약한 것으로 물리적, 화학적 메커니즘부터 측정, 모델링, 경제적 영향 및 완화에 이르기까지의 내용을 포함한다. 위도가 높은 지역에서 PV 의 인기와 실행 가능성이 증가함에 따라 눈 오염에 대한 상세한 논의도 포함하고 있다. 이 보고서는 광물성 먼지 입자와 눈으로 인한 모듈의 음영을 모두 다루지만 디젤 배가스, 조류 배설물, 이끼류 등과 같은 PV 시스템 수율 손실의 인위적, 동물학적 또는 생물학적 원인은 다루지 않는다.

2~63 μm 범위의 입자가 건조한 지역에서 오염의 주요 원인인 것으로 밝혀졌다. 일반적으로 이러한 입자는 수용성이라 비교적 쉽게 제거될 수 있다. 그러나 건조의 부차적인 단계와 함께 높은 습도의 영향을 받는 경우 점착력이 크게 증가할 수 있어 전문적인 청소를 필요로 한다.

오염은 또한 매우 이질적인 것으로 밝혀졌으며, 따라서 대규모 PV 시스템에서 오염 모니터링은 PV 시스템의 모니터링 규격 IEC 61724 에 설명된 바와 같이 여러 위치에서 수행되어야 한다. 또한 성능 데이터의 잘못된 해석을 방지하기 위해 조사량 센서의 정기적인 청소가 필수적이다. 오염 센서를 선택할 때 그러한 장치가 시스템의 모니터링 인프라에 얼마나 쉽게 일체화될 수 있는지 고려하는 것이 중요하다. 이상적인 솔루션은 가능한 한 유지보수가 최소화되도록 설치할 수 있어야 하며 모듈과 사이트 수준 모두에서 높은 정확도로 이질적인 오염을 탐지할 수 있어야 한다.

오염 메트릭스 예측 분야에서는 반물리적 모델부터 AI 방법을 사용하는 모델에 이르기까지 여러 클래스로 나눌 수 있는 다양한 모델이 있다. 이들의 공통적인 특징은 흔히 국지적 테스트 영역으로 제한되며 일반화하기 어렵다는 것이다. 위성 데이터를 기반으로 오염율을 예측할 수 있는 글로벌 차원에서 적용 가능한 모델은 현재 상당히 조잡하다. 고 위도에서의 오염 현상에 대한 예측 변수로 생겨난 눈 모델에 의해 예측된 에너지 손실은 모델과 경험적 데이터와의 차이의 원인을 이해하기 위해서는 여전히 더 많은 작업과 검증이 필요하다는 것을 보여준다.

연구에 따르면 PV 설비의 오염은 이미 2018 년에 전세계적으로 연간 PV 에너지 생산량의 최소 3~4%의 손실을 발생시켰을 수 있으며, 이는 최대 30~50 억 유로의 경제적 손실에 해당한다. 더 낮은 구성요소 비용과 자본지출에도 불구하고 PV 설치는 모든 지역에서 계속 확대될 것이기 때문에 절대적인 손실이 증가한다고 가정해야 한다.

글로벌 차원에서, 이러한 경제적 결과는 엄청나다. 4 장과 5 장에서 설명한 것처럼 기술 경제적 모델은 O&M 회사의 의사 결정을 지원한다. 특히 대형 발전소의 경우 청소 결정 일정은 청소 작업 비용을 최소화하기 위해 사전 정의된 작동과 유지보수 일정보다는 건전한 현장 모니터링에 기초해야 한다. 특히 오염율이 높은 건조 지역 대형 발전소의 경우는 추세가 로봇 또는 세미로봇 청소 쪽으로 기울어지고 있다.

기술적인 발전과 낮은 부품 비용으로 인해 높은 위도(및 고도)에서의 PV 시스템은 적설과 낮은 온도로 인한 시스템의 겨울철 스트레스에도 불구하고 점점 더 매력적인 것으로 인정받고 있다. 현재 지속 중인 연구 프로젝트는 구성요소 신뢰성, 예측 모델링 및 시스템 설계 최적화의 개선을 목표로 하고 있다. 고위도에서의 태양광 시스템에서 에너지 생산

손실을 완화하기 위해 필요한 고려사항에는 프레임 없는 모듈, 더 높은 경사각도, 눈 흘러내림 코팅, 양면형 모듈, 모듈의 하단 가장자리에 눈이 쌓이는 것을 최소화하기 위한 어레이 높이에 대한 주의 등이 포함된다.

결론적으로, PV 오염은 지속적으로 세계적인 이슈로 될 것이며, 이는 지구 온도 상승과 그에 따른 가뭄을 동반하는 기후 변화에 인해 악화될 것으로 예상된다. 오염 모델링, 적응 및 완화 분야에서의 추가적인 진전은 오염으로 인한 어려움에도 불구하고 PV 운영자가 발전 및 경제적 이득을 극대화할 수 있도록 돕는데 있어서 매우 소중하다.

부록 1: 입자 조성과 용해도

표 11: 일부 화합물 패밀리의 염과 그 가능한 기원의 목록.

화합물 광물 패밀리	염의 사례	화학식	가장 가능성 있는 기원
Nitrates	Sodium Nitrate	$NaNO_3$	atmospheric (Ozone + Nitrogen + Oxygen) industry or intensive agriculture or road traffic
	Potassium Nitrate	KNO_3	
Acetates	Calcium Acetate	$Ca(C_2H_3O_2)_2$	Polymers industry
	Potassium Acetate	$K(C_2H_3O_2)$	
Sulfates	Gypsum	$CaSO_4\ 2(H_2O)$	Evaporite Alteration of sulphide
	Potassium Sulfates	KSO_4	Fumarole Smogs ($H_2O\ +\ SO_2 +\ NO_2$)
	Sodium Sulfates	Na_2SO_4	Mirabilite or Thénardite industrial extraction Industrial production of chlorhydric acid, ...
	Ammonium Sulfate	$(NH_4)_2SO_4$	Mascagnite industrial extraction Intensive agriculture Industrial production $(NH_4)_2CO_3 + CaSO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + CaCO_3$
Chlorate	Sodium Chlorate	$NaClO_3$	Intensive agriculture Industrial production
	Magnesium Chlorate	$Mg(ClO_3)_2$	
Silicate-Phyllosilicate	Palygorskite	$(Mg,Al)_2Si_4O_{10}$ $(OH)\ 4(H_2O)$	Attapulgite clay industrial extraction

	Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Natural alteration of mica, or feld-spaths due to water, carbonic gas or organic acids.
Halide	Halite Sodium Chlorid	$NaCl$	Salt marshes Halite industrial extraction

교결(cementation)은 물을 첨가한 후 페이스트를 단순히 건조시키는 것이 아니라 시멘트 페이스트가 액체 상태에서 고체 상태로 넘어가도록 하는 화학적 수화 반응의 복잡한 세트이다.

콘크리트의 기본 원료인 Portland 시멘트는 수화 과정을 잘 보여주는 좋은 예이다. 관련된 화학반응에 대한 연구는 서로 다른 메커니즘을 인위적으로 분리한다. 실제로 이러한 메커니즘은 동시에 발생한다.

- 실리케이트의 수화: 이 시멘트에서 삼칼슘 실리케이트(Ca_3O_5Si)와 이칼슘 실리케이트(Ca_2O_2Si)는 이온으로 용해되어 상호작용하면서 수화칼슘 실리케이트$(CaO)_{1.7}(SiO_4)(H_2O)_4$)와 포틀랜드석($Ca(OH)_2$)을 형성한다. 수화칼슘은 젤과 같은 특성을 가지고 있다. 시멘트의 견고성을 주는 것은 바로 이 젤의 엉킴이다. 수화물 칼슘 분자는 수화되지 않은 입자 (grain)의 표면에서 성장하고 이 입자들 사이의 모세관 틈새를 채운다. 몇 시간 후, 입자 주위의 층은 물과 이온이 무수물 성분으로 확산되는 것을 늦출 수 있을 만큼 충분히 두꺼워진다. 수화는 느려지지만 이 프로세스는 몇 달 또는 몇 년 동안 계속될 수 있다.
- 알루미네이트의 수화: 트리칼슘 알루미네이트($CaO_3Al_2O_3$)는 물과 반응을 더 잘 하는 화합물이다. 반응은 여러 단계로 수행된다;
    - 1 단계: 알루미네이트가 석고와 반응하여 에트링가이트(ettringite) $(CaO)_6(Al_2O_3)(SO_3)_3{,}32H_2O$ 를 형성한다. 수화물 층이 입자들 주위에 보호층을 형성하면서 알루미네이트를 덮고 있다.
    - 2 단계: 석고가 소진되면 용액의 설페이트 농도가 감소한다. 에트링가이트는 불안정하게 되고 용해되어 $AFM(CaO)_3(Al_2O_3)(CaSO_4)12H_2O$ 라는 이름의 수화칼슘 모노설페이트를 형성한다
    - 3 단계: 몇 주 후에 에트링거이트는 완전히 AFM 으로 변환된다. 한 달에 걸쳐 수화칼슘의 알루미노페라이트를 형성하기 위해 반응은 알루미네이트 및 알루미노페라이트와 함께 천천히 일어나게 된다.

실리케이트와 알루미네이트인 다양한 수화 생성물의 배후에 있는 복잡한 메커니즘은 흡착, 가수분해, 용해, 용매화 및 결정화를 포함한다. 이런 과정은 아마도 대부분의 오염 교결 메커니즘에서도 유사할 것이다.

부록 2: 먼지 조성 서베이

표 12: 38 µm 이하로 선별한 시료에서 먼지 조성의 사례 [37]. PSDA 분석 [30].

Locality		Major 20-100%	Minor 5-20%	Trace <5%
Spain las Canarias	La Mala 29°05'50.50"N 13°27'43.92"W	Calcite[1], Quartz[2a]	Illite[2c]	Plagioclase[2b] , Aragonite[1], Dolomite[1], Hematite[3]
	La Mala 29°05'49.79"N 13°27'44.83"W	Calcite[1],	Quartz[2a]	Plagioclase[2b], Aragonite[1] Dolomite[1], Hematite[1] Halite[3]
	Mirador del Rio 29°13'39.86"N 13°28'20.92W	Quartz[2a], Illite[2c]	Calcite[1], Plagioclase[2b], Dolomite[1], Kaolinite[2c]	Hematite[4]
	Vega de femes 28°55'22.71°N 13°45'52.71W	Illite[2c]	Biotite[2c], Quartz[2a], Plagioclase[2b], Microcline[2b]	Calcite[1], Goethie[5] Hematite[4], Illite[2c] Kaolinite[2c]
Chile	Atacama Yungay 25°56'56.89"S 70°27'45.81"W	Quartz[2a] Illite[2c]	Anhydrite[6] Plagioclase[2b] Amphibole[2d]	Gypsum[6] Montmorillo-nite[2c]
	PSDA[*] Antofagas-ta	Quartz[2a] Anorthite[2a] Orthoclase[2b]	Albite[2b]	Gypsum[6]
USA	Arizona road undisclosed	Quartz[2a]		Plagioclase[2b], K-feldspar (Orthoclase[2b])
	Yuma AZ 32°52'27.06"N	Quartz[2a], Plagioclase[2b]	Calcite[1], Muscovite[2c],	Dolomite[1] Montmorillo-nite[2c],

	114°12’31.84W		Kaolinite[2c]	Gypsum[6]
	Yuma AZ 32°51’48.62”N 114°10’50.72”W	Quartz[2a], Calcite[1]	Plagioclase[2b], Muscovite[2c]	Kaolinite[2c], K-feldspar (Orthoclase[2b], Dolomite[1]
	FT.Carson CO 38°42’30.79N 104°47’10.56’W	Quartz[2a], Plagioclase[2b]	Muscovite[2c], Kaolinite[2c], Dolomite[1]	Calcite[1]
	Dugway UT, 40°11’30.10”N 113°09’50.05”W	Quartz[2a], Calcite[1]	Dolomite[1], Plagioclase[2b], Aragonite[1]	Muscovite[2c], K-feldspar (Orthoclase[2b]), Hematite[1]
Morocco	Lake Iriki 29°50’17.02”N 06°30’44.51”W	Quartz[2a], Illite[2c]	Calcite[1]	Kaolinite[2c] Dolomite[1]
Iraq	Camp Victory 33°15’17.09N 44°13’26.87”E	Quartz[2a], Calcite[1]	Kaolinite[2c] Plagioclase[2b], Dolomite[1]	Amphibole[2d], Montmorillo- nite[2c], Halite[7], Palygorskite[2c]

위 표에서 각 광물의 위 첨자는 Strunz 광물 분류를 나타낸다:

- [1]Carbonates
- [2a]Silicates:Tectosilicates
- [2b]Silicates:Tectosilates:Feldspathic
- [2c]Silicates:Phyllosilicates
- [2d]Silicates:Inosilicates
- [4]Oxydes
- [6]Sulfates
- [7]Halide

부록 3: 오염에 영향을 미치는 거시적, 제어 가능한 및 미시적인 인자들

미시적 접근 방법

미시적 접근방식의 첫 번째 단계는 먼지의 크기 분포와 광물 구성을 결정하기 위해 먼지 시료의 특성분석을 목표로 한다. 100 분의 1 mm 에서 2~3 mm 까지 큰 입자 소재의 분리는 체 분석법을 이용한다. 더 작은 입자의 분리는 물 속에서 크기별로 입자의 침전 속도의 차이나 혹은 크기가 다른 입자를 빼내기 위해 서로 다른 속도로 흐르는 워터젯의 기능을 기반으로 하는 수압 (hydraulic) 방식으로 수행된다. 구성요소의 분해를 피하기 위해 시료를 물에 담글 수 있다. 다른 방법으로, 덩어리 (aggregate)는 시료를 끓이고 다양한 시약으로 처리하여 부실 수 있다. 분석 중 현탁액의 응고를 방지하기 위해 안정제를 첨가한다. 또 다른 방법은 레이저 회절 (laser diffraction: LD)이다. 이것은 수백 나노미터부터 수 밀리미터까지의 입자 크기를 결정하는데 널리 사용되는 기술이다. 레이저 회절은 레이저 빔이 분산된 입자 시료를 통과할 때 산란되는 빛 세기의 각도 변화 확인을 통해 입자 크기 분포를 측정한다. 큰 입자는 레이저 빔에 비해 작은 각도로 빛을 산란시키고 작은 입자는 큰 각도로 빛을 산란시킨다. Mie 광 산란 이론을 이용하여, 산란 패턴을 형성하는 입자의 크기를 계산하기 의해 각 산란 (angular scattering) 강도 데이터가 분석되었다. 입자 크기는 그림 59 와 같이 체적 등가 구체의 직경으로 보고된다.

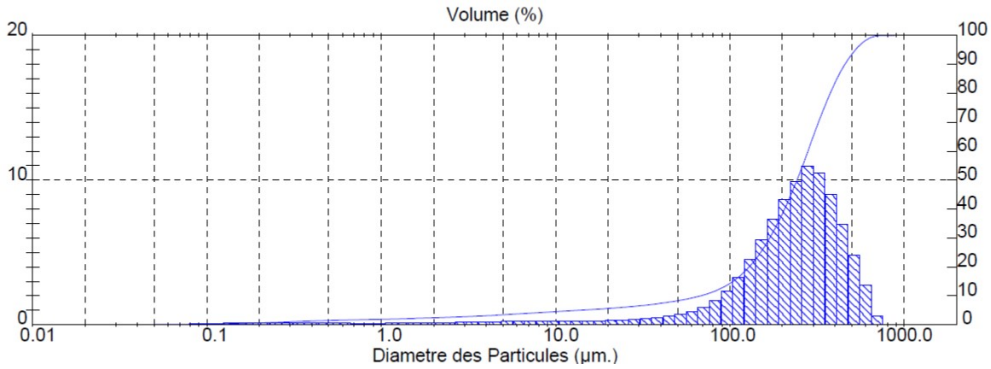


그림 59: 하나의 Masterizer 3000 장비로 수행한 하나의 먼지 시료의 크기 분포.

현미경 접근법의 두 번째 단계는 먼지의 광물 조성을 결정하는 것을 목표로 한다. 이 분석은 X-선 회절분석 (X-Ray Diffraction: XRD)을 통해 이루어진다. 그림 60 은 X'pert Highscore 소프트웨어와 PDF-4 데이터베이스와 함께 Panalytical Aeris 기구를 사용하여 얻은 하나의 회절 그래프를 보여준다. 이를 통해 피크를 해당 화합물에 할당할 수 있다

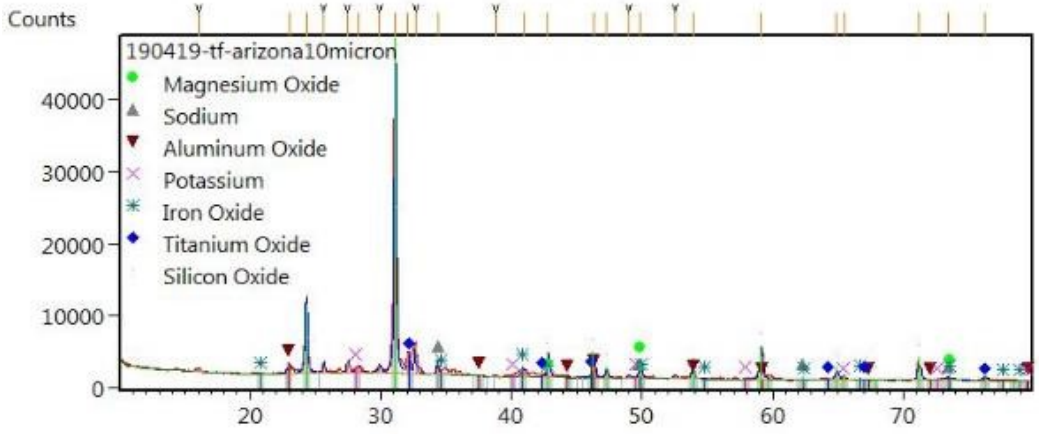


그림 60: 확인된 화합물과 회절 그래프(Diffractogram).

에너지 분산 X-선 (Energy Dispersive X-ray(EDX)은 원자 원소의 존재와 양을 밝히기 위한 것이다. 어떤 화합물을 직접적으로 명시하지 않더라도, 이 결과는 많은 광물의 가능성을 제거한다. EDX 를 주사 전자현미경과 결합시키면 EDX 는 정확하게 먼지 시료에 국한이 된다. 고배율 이미지는 또한 다양한 먼지 화합물의 형상과 배열에 대한 명확한 자료를 제공한다. 그림 61 은 하나의 결정화된 큰 광물 (10 μm)이 작은 광물 (1 μm)에 의해 둘러싸인 것을 보여주는데, 이는 케이킹 효과를 입증하는 것이다. 이 광물의 일부 (붉은 포인트)에 집중된 EDX 측정은 Ca 와 S 원자의 강한 존재를 보여준다. 이 두 원소는 황산칼슘 ($CaSO_4$)의 화학식으로 석고 또는 무수물의 존재를 입증한다. 이러한 가정은 XRD 나 투과 전자현미경 (Transmission Electron Microscopy: TEM) 또는 기타 육안검사를 통해 확인해야 한다.

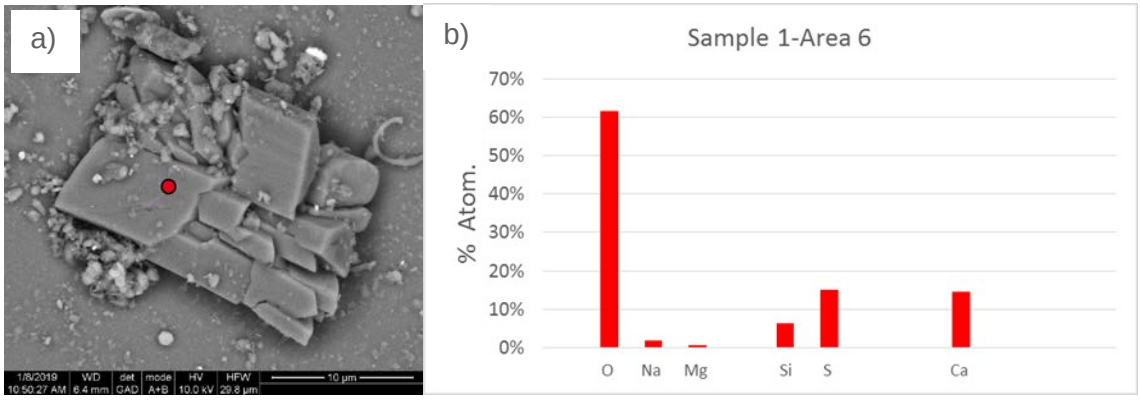


그림 61: (좌) SEM 이미지; (우) 해당하는 EDX 결과.

거시적 접근 방법

거시적 접근방식은 에어로졸 농도와 동시에 기상 현상의 영향을 관찰하는데 있다. 이 접근방식은 구하고자 하는 정보의 정확성에 따라 여러 수준에서 적용될 수 있다.

- 다년간 추정의 맥락에서, 유발된 손실은 공기 중에 부유하는 PM10 입자의 연평균 농도(공기 중 10 μm 이하)와 강우 빈도만을 고려하여 정량화될 수 있다. 이

접근방식에서의 불확도는 수 %이며 따라서 대상 영역에 요구되는 수단과 자원을 만들어낸다.

- 새로운 플랜트를 건설할 때 다른 기상학적 변수들을 고려할 필요가 있다. 카타르의 한 연구는 모래 폭풍과 같은 예외적인 사건은 무시한 채 풍속과 습도를 고려함으로써 좋은 상관관계를 보여주었다 [1].
- 청소 또는 보호 조치를 계획하려면 풍향과 같은 추가 매개변수를 고려해야 한다. 어떤 바람은 다른 바람보다 더 많은 먼지를 포함할 수 있다.

제어 가능한 접근 방법

제어 가능한 접근방식은 청결도를 극대화하기 위해 적용되는 방법뿐만 아니라 플랜트와 태양광 패널의 구성에 초점을 맞춘다. 주요 영향 인자들은 다음과 같다:

- 패널 스트링의 방향과 기술의 선택, 예를 들어 양면형 기술과 동-서 방향 배열과 함께 남향 배열(북반구)과 북향 배열(남반구)과의 비교를 통해 기술을 선택한다.
- 재부유되어 결과적으로 모듈을 덮는 오염의 성격과 입자의 존재
- 매우 국부적인 오염으로 결과적으로 미스매치의 소스가 되는 전기적 아키텍처
- 양면형인 경우 먼지에 연관된 토양 알베도의 변화
- 경사각도의 영향: 수평 모듈은 비교적 큰 입자에 의해 오염되고, 심하게 경사진 모듈은 더 작은 입자에 의해 오염된다.
- 모듈 온도: 이 매개변수는 초기 먼지 결합과 축적 프로세스에 큰 영향을 미친다.
- 모듈의 표면 코팅: 입자 크기 분포가 초기 점착에 영향을 미치며; 소수성 또는 친수성 특성이 교결과 자기 청소 프로세스를 직접적으로 좌우한다.

참고 문헌

[1] W. Javed, B. Guo and B. Figgis, “Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables,” *Solar Energy,* vol. 157, p. 397–407, 2017.

[2] L. Micheli, D. Ruth and M. Muller, “Seasonal Trends of Soiling on Photovoltaic Systems: Preprint,” Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-5J00-68673. , 2017.

[3] L. Micheli, M. G. Deceglie and M. Muller, “Predicting photovoltaic soiling losses using environmental parameters: An update,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* vol. 27, no. 3, p. 210–219, 2019.

[4] M. Gostein, K. Passow, M. G. Deceglie and L. Micheli, “Local Variability in PV Soiling Rate,” in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC 2018)*, Waikoloa Village, Hawaii, USA, 2018.

[5] K. Ilse, M. Werner, V. Naumann, B. W. Figgis, C. Hagendorf and J. Bagdahn, “Microstructural analysis of the cementation process during soiling on glass surfaces in arid and semi-arid climates,” *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters,* vol. Volume 10, no. Issue 7, pp. 525-529, 2016.

[6] K. Ilse, L. Micheli, B. W. Figgis, K. Lange, D. Daßler, H. Hanifi, F. Wolfertstetter, V. Naumann, C. Hagendorf, R. Gottschalg and J. Bagdahn, “Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation,” *Joule,* vol. 3, no. 10, p. 2303–2321, 2019.

[7] L. L. Kazmerski, Diniz, Antonia Sonia A. C., C. Brasil Maia, M. Machado Viana, S. C. Costa, P. P. Brito, C. Dias Campos, L. V. Machado Neto, S. Morais Hanriot and L. R. Oliveira Cruz, “Fundamental studies of the adhesion of dust to PV module chemical and physical relationships at the microscale,” in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, New Orleans, LA, USA, IEEE, 2015, p. 1–7.

[8] A. Sayyah, M. N. Horenstein and M. K. Mazumder, “Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels,” *Solar Energy,* vol. 107, p. 576–604, 2014.

[9] G. P. Smestad, T. A. Germer, H. Alrashidi, E. F. Fernández, S. Dey, H. Brahma, N. Sarmah, A. Ghosh, N. Sellami, I. A. I. Hassan, M. Desouky, A. Kasry, B. Pesala, S. Sundaram, F. Almonacid, K. S. Reddy, T. K. Mallick and L. Micheli, “Modelling photovoltaic soiling losses through optical characterization,” *SCIENTIFIC REPORTS,* vol. 10, no. 1, 2020.

[10] M. Köntges, S. Kurtz, C. E. Packard, U. Jahn, K. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu, M. Van Iseghem, J. Wohlgemuth, D. Miller, M. Kempe, P. Hacke, F. Reil, N. Bogdanski, W. Herrmann, C. Buerhop Lutz and G. Friesen, “Review of Failures of Photovoltaic Modules,” ISBN 987 3 906042 16 9, Report IEA PVPS T13 01:2014.

[11] S. C. Costa, A. S. A. Diniz and L. L. Kazmerski, “Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012–2015,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 63, p. 33–61, 2016.

[12] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli and L. L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,” *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, vol. 22, p. 698–733, 2013.

[13] J. Zorrilla-Casanova, M. Piliougine, J. Carretero, P. Bernaola, P. Carpena, L. Mora-Lopez and M. Sidrach-de-Cardona, “Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules,” Linköping University Electronic Press, 2011, p. 2985–2992.

[14] R. Appels, B. Lefevre, B. Herteleer, H. Goverde, A. Beerten, R. Paesen, K. Medts, J. Driesen and J. Poortmans, “Effect of soiling on photovoltaic modules,” *Solar Energy,* vol. 96, p. 283–291, 2013.

[15] E. Kymakis, S. Kalykakis and T. M. Papazoglou, “Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete,” *Energy Conversion and Management,* vol. 50, no. 3, p. 433–438, 2009.

[16] A. Massi Pavan, A. Mellit and D. Pieri, “The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants,” *Solar Energy,* vol. 85, no. 5, p. 1128–1136, 2011.

[17] A. Al-Otaibi, A. Al-Qattan, F. Fairouz and A. Al-Mulla, “Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools’ rooftop,” *Energy Conversion and Management,* vol. 95, p. 110–119, 2015.

[18] H. Qasem, T. R. Betts, H. Müllejans, H. AlBusairi and R. Gottschalg, “Dust-induced shading on photovoltaic modules,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* vol. 22, no. 2, p. 218–226, 2014.

[19] A. P. Bateman, H. Belassein and S. T. Martin, “Impactor Apparatus for the Study of Particle Rebound: Relative Humidity and Capillary Forces,” *Aerosol Science and Technology,* vol. 48, no. 1, p. 42–52, 2014.

[20] B. Figgis, A. Ennaoui, B. Guo, W. Javed and E. Chen, “Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension,” *Solar Energy,* vol. 137, p. 158–164, 2016.

[21] X. Li, D. L. Mauzerall and M. H. Bergin, “Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling,” *Nature Sustainability,* vol. 3, no. 9, p. 720–727, 2020.

[22] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou, Eds., Climate Change 2021 - The Physical Science Basis, IPCC, 2021: Summary for Policymakers., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 3−32.

[23] K. K. Ilse, B. W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf and J. Bagdahn, “Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 98, p. 239–254, 2018.

[24] B. S. Yilbas, H. Ali, M. M. Khaled, N. Al-Aqeeli, N. Abu-Dheir and K. K. Varanasi, “Influence of dust and mud on the optical, chemical, and mechanical properties of a pv protective glass,” *SCIENTIFIC REPORTS,* vol. 5, p. 15833, 2015.

[25] S. Mariraj Mohan, “An overview of particulate dry deposition: measuring methods, deposition velocity and controlling factors,” *International Journal of Environmental Science and Technology,* vol. 13, no. 1, p. 387–402, 2016.

[26] C. R. Lawrence and J. C. Neff, “The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition,” *Chemical Geology,* vol. 267, no. 1-2, p. 46–63, 2009.

[27] J. F. Kok, E. J. R. Parteli, T. I. Michaels and D. B. Karam, “The physics of wind-blown sand and dust,” *Reports on progress in physics. Physical Society (Great Britain),* vol. 75, no. 10, p. 106901, 2012.

[28] P. Ferrada, D. Olivares, V. del Campo, A. Marzo, F. Araya, E. Cabrera, J. Llanos, J. Correa-Puerta, C. Portillo, D. Román Silva, M. Trigo-Gonzalez, J. Alonso-Montesinos, G. López, J. Polo, F. J. Batlles and E. Fuentealba, “Physicochemical characterization of soiling from photovoltaic facilities in arid locations in the

Atacama Desert," *Solar Energy,* vol. 187, p. 47–56, 2019.

[29] D. Olivares, P. Ferrada, C. Matos, A. Marzo, E. Cabrera, C. Portillo and J. Llanos, "Characterization of soiling on PV modules in the Atacama Desert," *Energy Procedia,* vol. 124, p. 547–553, 2017.

[30] B. Figgis, A. Ennaoui, S. Ahzi and Y. Rémond, "Review of PV soiling particle mechanics in desert environments," *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 76, p. 872–881, 2017.

[31] S. Mekhilef, R. Saidur and M. Kamalisarvestani, "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells," *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 16, no. 5, p. 2920–2925, 2012.

[32] L. Dorobantu, M. O. Popescu, C. I. Popescu and A. Craciunescu, "The effect of surface impurities on photovoltaic panels," *Renewable Energy and Power Quality Journal,* p. 622–626, 2011.

[33] E. Urrejola, J. Antonanzas, P. Ayala, M. Salgado, G. Ramírez-Sagner, C. Cortés, A. Pino and R. Escobar, "Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile," *Energy Conversion and Management,* vol. 114, p. 338–347, 2016.

[34] G. McTainsh and C. Strong, "The role of aeolian dust in ecosystems," *Geomorphology,* vol. 89, no. 1-2, p. 39–54, 2007.

[35] K. K. Ilse, J. Rabanal, L. Schonleber, M. Z. Khan, V. Naumann, C. Hagendorf and J. Bagdahn, "Comparing Indoor and Outdoor Soiling Experiments for Different Glass Coatings and Microstructural Analysis of Particle Caking Processes," *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 8, no. 1, p. 203–209, 2018.

[36] J. P. Engelbrecht, H. Moosmüller, S. Pincock, R. K. M. Jayanty, T. Lersch and G. Casuccio, "Technical note: Mineralogical, chemical, morphological, and optical interrelationships of mineral dust re-suspensions," *Atmospheric Chemistry and Physics,* vol. 16, no. 17, p. 10809–10830, 2016.

[37] P. Burton and B. King, "Artificial soiling of photovoltaic module surfaces using traceable soil components," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Tampa Bay, FL, USA, IEEE, 2013, pp. 1542-1545.

[38] P. D. Burton and B. H. King, "Application and Characterization of an Artificial Grime for Photovoltaic Soiling Studies," *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 4, no. 1, p. 299–303, 2014.

[39] P. Piedra and H. Moosmüller, "Optical losses of photovoltaic cells due to aerosol deposition: Role of particle refractive index and size," *Solar Energy,* vol. 155, p. 637–646, 2017.

[40] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian and B. Horan, "Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how," *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 65, p. 1267–1278, 2016.

[41] T. Lombardo, A. Ionescu, A. Chabas, R.-A. Lefèvre, P. Ausset and Y. Candau, "Dose-response function for the soiling of silica-soda-lime glass due to dry deposition," *The Science of the total environment,* vol. 408, no. 4, p. 976–984, 2010.

[42] A. Chabas, A. Fouqueau, M. Attoui, S. C. Alfaro, A. Petitmangin, A. Bouilloux, M. Saheb, A. Coman, T. Lombardo, N. Grand, P. Zapf, R. Berardo, M. Duranton, R. Durand-Jolibois, M. Jerome, E. Pangui, J. J. Correia, I. Guillot and S. Nowak, "Characterisation of CIME, an experimental chamber for simulating interactions between materials of the cultural heritage and the environment," *Environmental science and pollution research international,* vol. 22, no. 23, p. 19170–19183, 2015.

[43] M. Melcher, R. Wiesinger and M. Schreiner, "Degradation of glass artifacts: application of modern surface

analytical techniques," *Accounts of chemical research,* vol. 43, no. 6, p. 916–926, 2010.

[44] E. F. Cuddihy, "Theoretical considerations of soil retention," *Solar Energy Materials,* vol. 3, no. 1-2, p. 21–33, 1980.

[45] J. Tomas, "Mechanics of Particle Adhesion, Extended master version of Tomas 2003 and full version of review paper of CHISA event," Prague, 2004.

[46] C. L. Perkins, M. Muller and L. Simpson, "Laboratory Studies of Particle Cementation and PV module Soiling," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington D.C., USA, IEEE, 2017, p. 2294–2297.

[47] G. Picotti, P. Borghesani, M. E. Cholette and G. Manzolini, "Soiling of solar collectors – Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces," *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 81, p. 2343–2357, 2018.

[48] B. Figgis, A. Nouviaire, Y. Wubulikasimu, W. Javed, B. Guo, A. Ait-Mokhtar, R. Belarbi, S. Ahzi, Y. Rémond and A. Ennaoui, "Investigation of factors affecting condensation on soiled PV modules," *Solar Energy,* vol. 159, p. 488–500, 2018.

[49] P. Hülsmann, M. Heck and M. Köhl, "Simulation of Water Vapor Ingress into PV-Modules under Different Climatic Conditions," *Journal of Materials,* vol. 2013, p. 1–7, 2013.

[50] K. K. Ilse, B. W. Figgis, M. Werner, V. Naumann, C. Hagendorf, H. Pöllmann and J. Bagdahn, "Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 186, p. 309–323, 2018.

[51] M. Gostein, J. R. Caron and B. Littmann, "Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants," in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Denver, CO, USA, IEEE, 2014, p. 0885–0890.

[52] L. Micheli, M. Muller and S. Kurtz, "Determining the effects of environment and atmospheric parameters on PV field performance," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Portland, OR, USA, IEEE, 2016, p. 1724–1729.

[53] B. Guo, W. Javed, B. W. Figgis and T. Mirza, "Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar," in *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, IEEE, 2015, p. 1–6.

[54] M. Gostein, B. Littmann, J. R. Caron and L. Dunn, "Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Tampa Bay, FL, USA, IEEE, 2013, p. 3004–3009.

[55] L. L. Kazmerski, A. S. A. Diniz, D. S. Braga, C. B. Maia, M. M. Viana, S. C. Costa, P. P. Brito, C. D. Campos, S. Morais Hanriot and L. R. Oliveira Cruz, "Interrelationships Among Non-Uniform Soiling Distributions and PV Module Performance Parameters, Climate Conditions, and Soiling Particle and Module Surface Properties," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington D.C., USA, IEEE, 2017, p. 2307–2311.

[56] R. K. Jones, A. Baras, A. A. Saeeri, A. Al Qahtani, A. O. Al Amoudi, Y. Al Shaya, M. Alodan and S. A. Al-Hsaien, "Optimized Cleaning Cost and Schedule Based on Observed Soiling Conditions for Photovoltaic Plants in Central Saudi Arabia," *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 6, no. 3, p. 730–738, 2016.

[57] A. Kimber , L. Mitchell, S. Nogradi and H. Wenger, "The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest region of the United States," in *2006 IEEE 4th World*

Conference on Photovoltaic Energy, Waikoloa, HI, USA, 2006.

[58] M. G. Deceglie, M. Muller, Z. Defreitas and S. Kurtz, "A scalable method for extracting soiling rates from PV production data," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Portland, OR, USA, IEEE, 2016, p. 2061–2065.

[59] P. Besson, C. Munoz, G. Ramirez-Sagner, M. Salgado, R. Escobar and W. Platzer, "Long-Term Soiling Analysis for Three Photovoltaic Technologies in Santiago Region," *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 7, no. 6, p. 1755–1760, 2017.

[60] L. Micheli, E. F. Fernandez, M. Muller and F. Almonacid, "Extracting and Generating PV Soiling Profiles for Analysis, Forecasting, and Cleaning Optimization," *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 10, no. 1, p. 197–205, 2020.

[61] M. Gostein, T. Düster and C. Thumann, "Accurately measuring PV soiling losses with soiling station employing module power measurements," in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, New Orleans, LA, USA, IEEE, 2015, pp. 2808-2810.

[62] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezadad and S. Hajighorbani, "Power loss due to soiling on solar panel: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 59, p. 1307–1316, 2016.

[63] J. R. Caron and B. Littmann, "Direct Monitoring of Energy Lost Due to Soiling on First Solar Modules in California," *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 3, no. 1, p. 336–340, 2013.

[64] J. Lopez-Garcia, A. Pozza and T. Sample, "Long-term soiling of silicon PV modules in a moderate subtropical climate," *Solar Energy,* vol. 130, pp. 174-183, 2016.

[65] W. Herrmann, M. Schweiger, G. Tamizhmani, B. Shisler and C. S. Kamalaksha, "Soiling and self-cleaning of PV modules under the weather conditions of two locations in Arizona and South-East India," in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference*, New Orleans, LA, USA, IEEE, 2015, pp. 1-5.

[66] M. A. Grammatico and B. W. Littmann, "Quantifying the anti-soiling benefits of anti-reflective coatings on first solar cadmium telluride PV modules," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference*, Portland, OR, USA, IEEE, 2016, pp. 1697-1701.

[67] M. Muller, L. Micheli and A. A. Martinez-Morales, "A Method to Extract Soiling Loss Data from Soiling Stations with Imperfect Cleaning Schedules," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington D.C., USA, IEEE, 2017, p. 2881–2886.

[68] C. Schill, S. Brachmann and M. Koehl, "Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules," *Solar Energy,* vol. 112, p. 259–262, 2015.

[69] "IEC 60891:2009 Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics," International Electrotechnical Commission, 2009.

[70] "CR-PVS1: PV Soiling Loss Index RTU (revision: 11/17)," Campbell Scientific, 2017.

[71] L. Dunn, B. Littmann, J. R. Caron and M. Gostein, "PV module soiling measurement uncertainty analysis," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Tampa Bay, FL, USA, IEEE, 2013, pp. 0658-0663.

[72] A. Skoczek, T. Sample and E. D. Dunlop, "The results of performance measurements of field-aged crystalline silicon photovoltaic modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* vol. 17, pp.

227-240, 2009.

[73] L. Fanni, I. Pola, E. Bura, T. Friesen and D. Chianese, “Investigation of annealing and degradation effects on a-Si PV modules in real operating conditions,” in *2009 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)*, Hamburg, Germany, 2009, pp. 3596 - 3599.

[74] K. Sinapis, G. Papageorgiou, K. Durose, M. van den Donker and W. Folkerts, “Outdoor degradation of CdTe modules at open circuit and at maximum power point,” in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, LA, USA, IEEE, 2015, pp. 1-5.

[75] D. van Velson, “DustIQ Soiling Measurement Instruction Manual,” Kipp and Zonen, Delft, 2018.

[76] M. Gostein, “Atonometrics white paper: specifying a soiling measurement system,” Atonometrics, Austin, 2018.

[77] *IEC 61724-1:2017, "Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring",* Geneva, Switzerland: International Electrical Commission IEC, 2017.

[78] A. A. Hegazy, “Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors,” *Renewable Energy,* vol. 22, no. 4, p. 525–540, 2001.

[79] J. Cano, J. J. John, S. Tatapudi and G. TamizhMani, “Effect of tilt angle on soiling of photovoltaic modules,” in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC*, Denver, CO, USA, IEEE, 2014, p. 3174–3176.

[80] M. Waters, T. Tirumalai, M. Gostein and B. Stueve, “Soiling Rates of PV Modules vs. Thermopile Pyranometers,” in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington D.C., USA, IEEE, 2017, p. 2923–2925.

[81] F. Wolfertstetter, K. Pottler, N. Geuder, R. Affolter, A. A. Merrouni, A. Mezrhab and R. Pitz-Paal, “Monitoring of Mirror and Sensor Soiling with TraCS for Improved Quality of Ground based Irradiance Measurements,” *Energy Procedia,* vol. 49, p. 2422–2432, 2014.

[82] C. Chen, “CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature,” *Journal of the American Society for Information Science and Technology,* vol. 57, no. 3, p. 359–377, 2006.

[83] L. Boyle, *Dissertation: Don’t Soil Your Chances With Solar Energy: Experiments Of Natural Dust Accumulation On Solar Modules And The Effect On Light Transmission,* University of Colorado, 2015.

[84] S. Toth, M. Muller, D. C. Miller, H. Moutinho, B. To, L. Micheli, J. Linger, C. Engtrakul, A. Einhorn and L. Simpson, “Soiling and cleaning: Initial observations from 5-year photovoltaic glass coating durability study,” *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 185, p. 375–384, 2018.

[85] B. Guo, W. Javed, S. Khan, B. Figgis and T. Mirza, “Models for Prediction of Soiling-Caused Photovoltaic Power Output Degradation Based on Environmental Variables in Doha, Qatar,” Charlotte, North Carolina, USA, ASME, 2016, p. V001T08A004.

[86] S. Pulipaka, F. Mani and R. Kumar, “Modeling of soiled PV module with neural networks and regression using particle size composition,” *Solar Energy,* vol. 123, p. 116–126, 2016.

[87] L. Micheli and M. Muller, “An investigation of the key parameters for predicting PV soiling losses: Key parameters for predicting PV soiling losses,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* vol. 25, no. 4, p. 291–307, 2017.

[88] R. R. Cordero, A. Damiani, D. Laroze, S. MacDonell, J. Jorquera, E. Sepúlveda, S. Feron, P. Llanillo, F. Labbe, J. Carrasco, J. Ferrer and G. Torres, “Effects of soiling on photovoltaic (PV) modules in the Atacama Desert,” *SCIENTIFIC REPORTS,* vol. 8, no. 1, 2018.

[89] S. You, Y. J. Lim, Y. Dai and C.-H. Wang, “On the temporal modelling of solar photovoltaic soiling: Energy and economic impacts in seven cities,” *Applied Energy,* vol. 228, p. 1136–1146, 2018.

[90] M. Coello and L. Boyle, “Simple Model for Predicting Time Series Soiling of Photovoltaic Panels,” *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 9, no. 5, p. 1382–1387, 2019.

[91] M. H. Bergin, C. Ghoroi, D. Dixit, J. J. Schauer and D. T. Shindell, “Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust and Particulate Air Pollution,” *Environmental Science & Technology Letters,* vol. 4, no. 8, p. 339–344, 2017.

[92] B. Laarabi, O. May Tzuc, D. Dahlioui, A. Bassam, M. Flota-Bañuelos and A. Barhdadi, “Artificial neural network modeling and sensitivity analysis for soiling effects on photovoltaic panels in Morocco,” *Superlattices and Microstructures,* vol. 127, p. 139–150, 2019.

[93] S. Shapsough, R. Dhaouadi and I. Zualkernan, “Using Linear Regression and Back Propagation Neural Networks to Predict Performance of Soiled PV Modules,” *Procedia Computer Science,* vol. 155, p. 463–470, 2019.

[94] L. Micheli, M. G. Deceglie and M. Muller, “Mapping Photovoltaic Soiling Using Spatial Interpolation Techniques,” *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 9, no. 1, p. 272–277, 2019.

[95] S. Pelland, P. Pawar, A. Veeramani, W. Gustafson and L. L. A. Etringer, “Testing Global Models of Photovoltaic Soiling Ratios Against Field Test Data Worldwide,” in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa Village, HI, USA, IEEE, 2018, p. 3442–3446.

[96] L. Zhou, D. B. Schwede, K. W. Appel, M. J. Mangiante, D. C. Wong, S. L. Napelenok, P.-Y. Whung and B. Zhang, “The impact of air pollutant deposition on solar energy system efficiency: An approach to estimate PV soiling effects with the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model,” *Science of the Total Environment,* vol. 651, p. 456–465, 2019.

[97] R. E. Pawluk, Y. Chen and Y. She, “Photovoltaic electricity generation loss due to snow – A literature review on influence factors, estimation, and mitigation,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 107, p. 171–182, 2019.

[98] Government of Canada, *"Engineering Climate Datasets", Natural Resources Canada,* 2019.

[99] B. Marion, R. Schaefer, H. Caine and G. Sanchez, “Measured and modeled photovoltaic system energy losses from snow for Colorado and Wisconsin locations,” *Solar Energy,* vol. 97, p. 112–121, 2013.

[100] T. Townsend and L. Powers, “Photovoltaics and snow: An update from two winters of measurements in the SIERRA,” in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA, IEEE, 2011, p. 3231–3236.

[101] S. A. Krajewski and B. L. Gibbs, Understanding Contouring: A Practical Guide to Spatial Estimation Using a Computer and Basics of Using Variograms, Colorado: Gibbs Associates, 2014.

[102] C. Baldus-Jeursen, “Analysis of Fort Simpson Airport Photovoltaic System Performance from January 1, 2015 to December 31, 2018,” Varennes, 2018.

[103] M. Mani and R. Pillai, “Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 14, no. 9, p. 3124–3131, 2010.

[104] National Renewable Energy Laboratory, Sandia National Laboratory, SunSpec Alliance and SunShot National Laboratory Multiyear Partnership (SuNLaMP) PV O&M, “Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems; 3rd Edition,” 2018.

[105] L. Cristaldi, M. Faifer, M. Rossi, M. Catelani, L. Ciani, E. Dovere and S. Jerace, “Economical evaluation of PV system losses due to the dust and pollution,” IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE, 2012, p. 614–618.

[106] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale and T. Urmee, “Energy and economic losses caused by dust on residential photovoltaic (PV) systems deployed in different climate areas,” *Renewable Energy,* vol. 120, p. 401–412, 2018.

[107] F. A. Mejia and J. Kleissl, “Soiling losses for solar photovoltaic systems in California,” *Solar Energy,* vol. 95, p. 357–363, 2013.

[108] W. Herrmann, *Energy yield of PV power plants – Approaches for the determination of yield losses due to dust soiling in desert climates,* InDust Workshop 16 May 2019, Intersolar Europe, Munich, Germany, 2019.

[109] M. G. Deceglie, L. Micheli and M. Muller, “Quantifying Year-to-Year Variations in Solar Panel Soiling from PV Energy-Production Data,” in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington D.C., USA, IEEE, 2017, p. 2804–2807.

[110] Faifer M., Lazzaroni M., Toscani S., “Dust effects on the PV plant efficiency: A new monitoring strategy,” in *20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing*, Benevento, Italy, 2014.

[111] S. C. Costa, A. S. A. Diniz and L. L. Kazmerski, “Solar energy dust and soiling R&D progress: Literature review update for 2016,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 82, p. 2504–2536, 2018.

[112] H. Haeberlin and J. D. Graf, “Gradual Reduction of PV Generator Yield due to Pollution,” in *1998 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Vienna, Austria, 1998, pp. 2764-2767.

[113] A. AlDowsari, R. Bkayrat, H. AlZain and T. Shahin, “Best practices for mitigating soiling risk on PV power plants,” Jeddah, Saudi Arabia, IEEE, 2014, p. 1–6.

[114] W. Glaubitt and P. Löbmann, “Anti-soiling effect of porous SiO2 coatings prepared by sol–gel processing,” *Journal of Sol-Gel Science and Technology,* vol. 59, no. 2, p. 239–244, 2011.

[115] A. Einhorn, L. Micheli, D. C. Miller, L. J. Simpson, H. R. Moutinho, B. To, C. L. Lanaghan, M. T. Muller, S. Toth, J. J. John, S. Warade, A. Kottantharayil and C. Engtrakul, “Evaluation of Soiling and Potential Mitigation Approaches on Photovoltaic Glass,” *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 9, no. 1, p. 233–239, 2019.

[116] M. A. M. L. Jesus, G. Timò, C. Agustín-Sáenz, I. Braceras, M. Cornelli and A. d. M. Ferreira, “Anti-soiling coatings for solar cell cover glass: Climate and surface properties influence,” *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 185, p. 517–523, 2018.

[117] M. A. Bahattab, I. A. Alhomoudi, M. I. Alhussaini, M. Mirza, J. Hegmann, W. Glaubitt and P. Löbmann, “Anti-soiling surfaces for PV applications prepared by sol-gel processing: Comparison of laboratory testing and outdoor exposure,” *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 157, p. 422–428, 2016.

[118] K. Ilse, M. Z. Khan, N. Voicu, V. Naumann, C. Hagendorf and J. Bagdahn, “Advanced performance testing of anti-soiling coatings – Part I: Sequential laboratory test methodology covering the physics of natural soiling processes,” *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 202, p. 110048, 2019.

[119] K. Ilse, M. Z. Khan, N. Voicu, V. Naumann, C. Hagendorf and J. Bagdahn, “Advanced performance testing of anti-soiling coatings - Part II: Particle-size dependent analysis for physical understanding of dust removal processes and determination of adhesion forces,” *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 202, p. 110049, 2019.

[120] T. Lorenz, E. Klimm and K.-A. Weiss, “Soiling and Anti-soiling Coatings on Surfaces of Solar Thermal Systems – Featuring an Economic Feasibility Analysis,” *Energy Procedia,* vol. 48, p. 749–756, 2014.

[121] S. Mondal, A. K. Mondal, A. Sharma, V. Devalla, S. Rana, S. Kumar and J. K. Pandey, “An overview of cleaning and prevention processes for enhancing efficiency of solar photovoltaic panels,” *CURRENT SCIENCE,* vol. 115, no. 6, p. 13, 2018.

[122] G. C. Oehler, F. Lisco, F. Bukhari, S. Uličná, B. Strauss, K. L. Barth and J. M. Walls, “Testing the Durability of Anti-Soiling Coatings for Solar Cover Glass by Outdoor Exposure in Denmark,” *Energies,* vol. 13, no. 2, p. 299, 2020.

[123] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, R. H. Hamid, F. El-Hussainy, M. M. Beheary and K. M. Abdel-Moneim, “Effect of dust on the transparent cover of solar collectors,” *Energy Conversion and Management,* vol. 47, no. 18-19, p. 3192–3203, 2006.

[124] S. Bhaduri and A. Kottantharayil, “Mitigation of Soiling by Vertical Mounting of Bifacial Modules,” *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 9, no. 1, p. 240–244, 2019.

[125] S. Bhaduri, S. Chattopadhyay, S. Zachariah, C. S. Solanki and A. Kottantharayil, “Evaluation of Increase in the Energy Yield of PV Modules by Inverting the Panels during the Non-Sunshine Hours,” in *26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Singapore, 2016.

[126] S. Warade and A. Kottantharayil, “Analysis of Soiling Losses for Different Cleaning Cycles,” in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa Village, HI, USA, IEEE, 2018, p. 3644–3647.

[127] J. J. John, Characterization of Soiling Loss on Photovoltaic Modules, and Development of a Novel Cleaning System, Bombay, India: Indian Institute of Technology, 2015.

[128] J. Kurz, “PV Cleaning: Choosing the Optimal Method and Frequency,” *Solar Power Europe Webinar ,* p. 25, October 18, 2017.

[129] M. T. Grando, E. R. Maletz, D. Martins, H. Simas and R. Simoni, “Robots for Cleaning Photovoltaic Panels: State of the Art and Future Prospects,” in *Actas de las IX Jornadas Argentinas de Robótica*, Córdoba, Argentina, 2017.

[130] S. Masuda, K. Fujibayashi, K. Ishida and H. Inaba, “Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain,” *Electronic Engineering in Japan,* pp. 92:9-18, 1972.

[131] A. Faes, D. Petri, J. Champliaud, J. Geissbühler, N. Badel, J. Levrat, B. Roustom, A. Hessler-Wyser, N. Wyrsch, C. Ballif, G. Getaz, G. McKarris and M. Despeisse, “Field test and electrode optimization of electrodynamic cleaning systems for solar panels,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* vol. 27, no. 11, p. 1020–1033, 2019.

[132] S. P. Hersey, R. M. Garland, E. Crosbie, T. Shingler, A. Sorooshian, S. Piketh and R. Burger, “An overview

of regional and local characteristics of aerosols in South Africa using satellite, ground, and modeling data," *Atmospheric Chemistry and Physics,* vol. 15, p. 4259–4278, 2015.

[133] N. Ferretti, *White Paper PV Module Cleaning, Market Overview and Basics,* PI Berlin, 2018.

[134] *European Parliament and the Council of the European Union, EC/2006/42, Essential health and safety requirements relating to the design and construction of machinery,* 2006.

[135] *EN 1096-5:2016-06, "Glass in building - Coated glass - Part 5: Test method and classification for the self-cleaning performances of coated glass surfaces",* 2016.

[136] *ECE R45, Supplement 4.2, "Uniform provisions concerning the approval of headlamp cleaners and of power driven vehicles with regard to headlamp cleaners (Test Dirt: Quartz-Coal Mixture)".*

[137] *ISO 12103-1, "Road vehicles — Test contaminants for filter evaluation — Part 1: Arizona test dust",* 2016.

[138] *DIN EN ISO 20566, 2013-06, "Paints and varnishes -- Determination of the scratch resistance of a coating system using a laboratory-scale car-wash",* 2013.

[139] *IEC 62788-7-3 ED1, "Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules - Part 7-3: Environmental exposures - Accelerated abrasion tests of PV module external surfaces (test of small glass samples)",* Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.

[140] *ASTM D2486-17:2017, "Standard test methods for scrub resistance of wall paints",* 2017.

[141] *DIN 53778-2, "Emulsion paints for interior use: evaluation of cleanability and of wash and scrub resistance of coatings, 1983-08",* 1983.

[142] K. Ilse, *Cleaning resistance of glass coatings, Test report V403/2018 www.fsolar.de,* Fraunhofer CSP, 2018.

[143] N. Ferretti, A. Sönmez, F. Schneider, B. Litzenburger, S. Janke, T. Weber, J. Berghold and P. Grunow, "Reflectance Measurements for Testing the Effect of Module Cleaning on the Glass Surface," *2015 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC),* pp. 2538 - 2544, 2015.

[144] N. Ferretti, K. Ilse, A. Sönmez, C. Hagendorf and J. Berghold, "Investigation on the Impact of Module Cleaning on the Antireflection Coating," *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,* 2016.

[145] *EN 1096-5:2012, "Glass in building - Coated glass - Part 2: Requirements and test methods for class A, B and S coatings. Annex E: Abrasion resistance test",* 2012.

[146] N. Ferretti, A. El-Issa and L. Podlowski, "Standardized Test Procedure for PV Module Cleaning Equipment," in *2019 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC)*, Marseille, France, 2019, pp. 805 - 809.

[147] G. Mathiak, D. Grimm, L. Rimmelspacher, W. Herrmann, F. Reil, J. Althaus and A. Morlier, "PV Module and Solar Glass Trickling Sand Testing," in *2018 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Brussels, Belgium, 2018, pp. 1092 - 1096.

[148] *DIN spec 4867, (under development): "Reinigungsprüfverfahren für die Abrasionsbeständigkeit von Photovoltaik-Modulen - Cleaning test method for the abrasion resistance of photovoltaic modules.",* 2022.

[149] Amtec Kistler GmbH, *Laboratory car wash for testing the scratch resistance of coatings, www.amteckistler.de, download 2020,* 2020.

[150] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale and T. Urmee, “Dust Effect and its Economic Analysis on PV Modules Deployed in a Temperate Climate Zone,” *Energy Procedia,* vol. 100, p. 65–68, 2016.

[151] B. Stridh, “Economical Benefit of Cleaning of Soiling and Snow Evaluated for PV Plants at Three Locations in Europe,” *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,* 2012.

[152] N. Heidari, J. Gwamuri, T. Townsend and J. M. Pearce, “Impact of Snow and Ground Interference on Photovoltaic Electric System Performance,” *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 5, no. 6, p. 1680–1685, 2015.

[153] R. W. Andrews, A. Pollard and J. M. Pearce, “The effects of snowfall on solar photovoltaic performance,” *Solar Energy,* vol. 92, p. 84–97, 2013.

[154] G. Becker, B. Schiebelsberger, W. Weber, J. Schumacher, M. Zehner, G. Wotruba and C. Vodermayer, “Energy Yields of PV Systems - Comparison of Simulation and Reality,” *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September 2008, Valencia, Spain,* 2008.

[155] T. Sugiura, T. Yamada, H. Nakamura, M. Umeya, K. Sakuta and K. Kurokawa, “Measurements, analyses and evaluation of residential PV systems by Japanese monitoring program,” *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 75, no. 3-4, p. 767–779, 2003.

[156] M. Child and C. Breyer, “Vision and initial feasibility analysis of a recarbonised Finnish energy system for 2050,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 66, p. 517–536, 2016.

[157] E. Bellini, “Russian Far East sees 75MW of large scale solar come online,” *PV Magazine,* 2019, Nov.1 .

[158] D. Dissing, “Radiation climatology of Alaska,” University of Alaska Fairbanks.

[159] L. Burnham, *Performance of Bifacial Modules on a Dual-Axis Tracker in a High-Albedo Environment,* https://www.osti.gov/servlets/purl/1641282 last accessed Dec 2022, 2019, p. 8.

[160] J. L. Braid, D. Riley, J. M. Pearce and L. Burnham, “Image Analysis Method for Quantifying Snow Losses on PV Systems,” in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Virtual Meeting, IEEE, 2020, p. 1510–1516.

[161] E. Lorenz, D. Heinemann and C. Kurz, “Local and regional photovoltaic power prediction for large scale grid integration: Assessment of a new algorithm for snow detection,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* vol. 20, no. 6, p. 760–769, 2012.

[162] A. P. Dobos, *PV Watts Version 5 Manual. NREL/TP-6A20-62641,* 2014.

[163] D. F. J. Ryberg, *Integration, Validation, and Application of a PV Snow Coverage Model in SAM. Report number: NREL/TP-6A20-64260.,* September 2015.

[164] A. Granlund, J. Narvesjö and A. M. Petersson, “The Influence of Module Tilt on Snow Shadowing of Frameless Bifacial Modules,” in *2019 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Marseille, France, 2019, pp. 1646 - 1650.

[165] B. Hashemi, A.-M. Cretu and S. Taheri, “Snow Loss Prediction for Photovoltaic Farms Using Computational Intelligence Techniques,” *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 10, no. 4, p. 1044–1052, 2020.

[166] S. Hosseini, S. Taheri, M. Farzaneh and H. Taheri, “Modeling of Snow-Covered Photovoltaic Modules,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 65, no. 10, p. 7975–7983, 2018.

[167] X. Liu, S. J. Rees and J. D. Spitler, “Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model

development," *Applied Thermal Engineering,* vol. 27, no. 5-6, p. 1115–1124, 2007.

[168] S. L. Hockersmith, Experimental and Computational Investigation of Snow Melting on heated horizontal Surfaces, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, USA, 2002.

[169] A. Rahmatmand, S. J. Harrison and P. H. Oosthuizen, "Numerical and experimental study of an improved method for prediction of snow melting and snow sliding from photovoltaic panels," *Applied Thermal Engineering,* vol. 158, p. 113773, 2019.

[170] D. Riley, L. Burnham, B. Walker and J. M. Pearce, "Differences in Snow Shedding in Photovoltaic Systems with Framed and Frameless Modules," in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, IEEE, 2019, p. 0558–0561.

[171] J. Bogenrieder, C. Camus, M. Hüttner, P. Offermann, J. Hauch and C. J. Brabec, "Technology-dependent analysis of the snow melting and sliding behavior on photovoltaic modules," *Journal of Renewable and Sustainable Energy,* vol. 10, no. 2, p. 021005, 2018.

[172] G. Mathiak, J. Sommer, W. Herrmann, N. Bogdanski, J. Althaus and F. Reil, "PV Module Damages Caused by Hail Impact and Non-Uniform Snow Load," in *2016 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, Germany, 2016, pp. 1692 - 1696.

[173] E. J. Schneller, H. Seigneur, J. Lincoln and A. M. Gabor, "The Impact of Cold Temperature Exposure in Mechanical Durability Testing of PV Modules," in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, IEEE, 2019, p. 1521–1524.

[174] C. Pike, E. Whitney, M. Wilber and J. S. Stein, "Field Performance of South-Facing and East-West Facing Bifacial Modules in the Arctic," *Energies,* vol. 14, no. 4, p. 1210, 2021.

[175] A. M. Gabor, R. Janoch, A. Anselmo, J. Lincoln, E. J. Schneller, H. Seigneur, D. J. Harwood and M. W. Rowell, "Mounting Rail Spacers for Improved Solar Panel Durability," in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, IEEE, 2019, p. 0131–0135.

[176] J. S. Malmsten, *"Solceller på tak" - "Solar cells on the roof",* BELOK large commercial building in cooperation with Swedish Energy Agency, 2015 Dec..

부록 영어-한글 용어 비교

abraison	마모
absorbance	흡광율
absorption	흡수
adhesion	점착, 부착
adsorption	흡착
Aerosol-Optical-Depths (AOD)	에어로졸 광학깊이
aggregate	덩어리
air mass	에어매스
albedo	알베도
albite	조장석
aluminates	알루미네이트, 알루민산염
amorphous silicon (a-Si)	비정질실리콘
amphibole	각섬석
Analysis of variance (ANOVA)	분산 분석
anorthite	회장석
anti-reflection coating (ARC)	반사방지 코팅
anti-soiling	오염방지
arid	건조
array	어레이
artificial neural network (ANN)	인공신경망
availability	가용성
azimuth	방위각
balance of system (BOS)	주변장치
bassanite	바사나이트
best practice	모범 사례
biased	편향
bifacial	양면형
bifaciality coefficient	양면형 계수
binary variable	이진 변수
biotite	흑운모
blistering	기포 발생

blotch	얼룩
build attached PV (BAPV)	건물부착형 태양광
build integrated PV (BIPV)	건물일체형 태양광
busbar	버스바
bypass diode	바이패스 다이오드
cadmium telluride (CdTe)	카드뮴 텔루라이드
caking	점결, 고결, 케이킹
calcite	방해석
calibration	교정
capacity factor (CF)	용량 인자
capital expenditures (CAPEX)	자본지출
capillarity	모세관현상
capillary aging	캐필러리 에이징
capillary force	모세관힘
carrier	캐리어, 반송자
category	범주, 카테고리
charge controller	충전 제어기
cementation	교결(膠結)
chlorite	녹니석
clay	점토
cleaning	청소
cleanness index	청결 지수
clear sky	청명
climate zone	기후대
clinochlore	사녹니석
cohesion	응집
combiner box	컴바이너 박스, 결합기 박스
coagulation	응고
Concentrated Solar Power (CSP)	집중식 태양열발전
connector	커넥터, 연결기
contact angle (CA)	접촉각
corrective	시정의
correction	보정
corundum	코런덤, 산화알루미늄, 강옥
cristobalite	홍연석

crystalline silicon (c-Si)	결정질실리콘
dark	암상태
daylight hours	일광 시간
defect	결함
degradation	열화
degradation rate	열화율
deposition	퇴적, 증착
detect	탐지하다
direct normal irradiance (DNI)	직달 법선면 조사강도
dolomite	백운석
dual axis	양축
durability	내구성
dust intensity	먼지 강도, 먼지 극심함
dust soiling	먼지오염
electrodynamic (ED)	전기역학적
electroluminescence (EL)	전계발광
Electrostatic Discharge (ESD)	정전 방전
Electrostatic force	정전기력
emissivity	방사율
energy yield	에너지 수율, 산출량
enterprise resource planning (ERP)	전사적 자원관리
EPC (engineering, procurement, construction)	설계 시공 일괄 방식
ettringite	에트링가이트
failure	불량
failure rate	불량률
fault	결함, 고장, 사고
feed in tariff (FIT)	발전차액
feldspars	장석류
fill factor	충진율
first principle	제 1 원리
flat-plate	평판
float glass	플로트 유리
freeze-thaw	동결융해(용융)
geospacial	지리공간
global horizontal irradiance (GHI)	글로벌 수평면 조사강도

grid	그리드, 계통선
grid-connected	계통연계형
half-cut	하프컷
halite	암염
hematite	적철석
hot spot	핫스팟, 열점
hydrophobic	소수성
hydrophilic	친수성
hygrometry	습도 측정법
hygroscopicity	흡습성
ice-phobic	일조량
insolation	일조량
interstitial	침입형
intrinsic	진성의
inverter	인버터
irradiance	조사강도
irradiation	조사량
I-V curve	전류-전압 곡선
junction box (JB)	정션박스
label	라벨
land cover	토지 피복
levelised cost of electricity (LCOE)	균등화발전단가
lifecycle cost	수명주기 비용
light soaking	광조사, 광흡수
linear regression	선형 회귀
maintenance	유지보수
maximum power point tracking (MPPT)	최대출력점 추종
power at maximum power point (Pmpp)	최대출력점 전압
metrics	지표, 메트릭스
mitigation measures (MM)	완화 조치
module	모듈
moisture	수분, 습기
monoclinic	단사정계
mono-crystalline	단결정의
monofacial	단면형

morphology	모폴로지
mounting	장착
multi-crystalline	다중결정의
multi-variate regression	다변량 회귀
muscovite	백운모
Net Present Value (NPV)	순 현재가치
nominal	공칭의
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	태양전지의 공칭 작동 온도
normalized difference vegetation index (NDVI)	정규화 식생지수
operation & maintenance (O&M)	운영 및 유지보수
operational expenditures (OPEX)	운영지출
optical depth	광학 깊이
outlier	이상치, 특이치
parameter	파라미터, 매개변수
particle mass (PM)	입자 질량
pass/fail	합격/불합격
payback time	회수기간
performance index	성능지수
performance ratio	성능비
photocatalytic	광촉매의
photoluminescence	광루미네선스, 광발광
photovoltaic (PV)	태양광
plane of array (POA)	어레이면
plant	플랜트, 발전소
platelet	작은 판상
power output	출력 산출량
preconditioning	전처리
preventive maintenance	예방적 유지보수
pyranometer	일사량계
pyrheliometer	직달일사량계
qualification	적격성
rack	랙
racking	랙킹
radiation	복사
reference cell	기준 태양전지, 기준 셀

reflectance	반사율
response time	대응시간
return on investment (ROI)	투자 수익률
revenue	수입
ribbon	리본
robustness	견고성
rooftop	루프탑
roughness	거칠기, 조도
safety	안전
saturation current	포화 전류
Scanning Electron Microscopy (SEM)	주사전자현미경
sedimentation	침강
settling	침강
shading	음영
shape factor	형상 인자
shingle	슁글
short circuit current (I_{sc})	단락전류
shunt	션트
sieve	체
silicates	실리케이트, 규산염
silt	토사
snow-phobic	스노우 포빅
snow shading	눈 음영, 스노우 쉐이딩
snow-shedding	스노우 쉐딩, 눈 흘러내림
snow sliding	눈 미끄러짐
snowy	다설
soiling	오염
soiling factor	오염 인자
soiling loss	오염 손실
soiling ratio	오염비
soiling rate	오염율, 오염 비율
solar noon	태양 정오
solubility	용해도
spatial interpolation	공간 내간
specification	명세, 사양

spectral response (SR)	분광응답
spectrometer	분광계
standardization	규격화, 표준화
standard test condition (STC)	표준시험조건
stochastic	확률론적
string	스트링
Structured glass	구조용 유리
sun hour	일조 시간
temperature coefficient	온도계수
texture	텍스처
thermopile	서모파일, 열전퇴
threshold	임계치
time-series	시계열
total suspended particle (TSP)	총 부유입자
tracker	트랙커
tracking	트랙킹, 추적식
travelling wave	진행파
typical meteorological year (TMY)	기상년
uncertainty	불확도
van der Waals forces	반데르발스력
vegetation	수목
visual inspection (VI)	육안검사
wetness	습윤
wetting	습윤
X-ray diffraction (XRD)	X-선 회절

한글 옮김 문의: khdbs52@gmail.com

ISBN 978-3-907281-09-3
9 783907 281093